



**Universidade de  
Aveiro  
2011**

Departamento de Engenharia Civil

**Lucília Maria  
Gomes Nunes**

**Eficiência energética de edifícios:  
Contributo dos PCMs e Parede Trombe**





**Universidade de  
Aveiro  
2011**

Departamento de Engenharia Civil

**Lucília Maria  
Gomes Nunes**

**Eficiência energética de edifícios :  
Contributo dos PCMs e Parede Trombe**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Maria Fernanda Rodrigues, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação do Professor Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



**o júri**

presidente

**Professor Doutor Aníbal Guimarães da Costa**

professor catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor António José Barbosa Samagaio**

professor associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Maria Fernanda Da Silva Rodrigues**

professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor Romeu Da Silva Vicente**

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

Aos meus orientadores científicos Professora Doutora Maria Fernanda Rodrigues e Professor Doutor Romeu Vicente, pelo apoio, orientação e sugestões essenciais para a concretização desta dissertação.

Ao Doutor Hélder Gonçalves e à Doutora Marta Oliveira Panão do LNEG, pela disponibilidade e colaboração prestada, indispensáveis para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Albertina e Joaquim, as pessoas mais importantes da minha vida. Sempre estiveram ao meu lado, confiaram em mim, quando eu própria duvidei, sem eles não seria a pessoa que sou, obrigada.

Um agradecimento especial ao meu namorado, André, por todo o apoio, compreensão, ajuda e amor incondicional, não só nesta etapa final, mas em todo o meu percurso académico que sempre esteve ao meu lado.

À Ivânia agradeço o enorme apoio, motivação e disponibilidade pessoal que sempre demonstrou em me ajudar.

A todos os meus verdadeiros amigos, por existirem, fazerem parte da minha vida e apoiarem-me em todos os momentos, independentemente da distância.

Um muito obrigada a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.





**palavras – chave**

Eficiência energética, sistemas solares passivos, materiais mudança de fase (PCM), parede de trombe, armazenamento de energia calorífica.

**Resumo**

Dada a crescente utilização de energia elétrica nos edifícios, as restrições na capacidade de aumento de geração de eletricidade, a excessiva dependência de combustíveis fósseis para a produção de energia elétrica, há uma necessidade premente de se alcançar a eficiência energética nos edifícios. São fundamentais novas abordagens para a concepção de edifícios com menor utilização de energia elétrica e que atendam às suas necessidades de energia inteiramente a partir de fontes renováveis, abrindo assim o caminho para o paradigma da utilização de sistemas passivos. A importância atribuída a esta urgência de encontrar soluções energeticamente eficientes tem conduzido a diversos programas de investigação orientados no sentido da conservação e armazenamento da energia, através do desenvolvimento de novos materiais e técnicas construtivas. Em particular, no que diz respeito ao desenvolvimento de novos materiais com melhor desempenho térmico, têm sido realizados inúmeros estudos sobre os materiais mudança de fase (PCM) e a sua aplicabilidade na construção. Esta dissertação apresenta um estudo sobre a incorporação de painéis de PCM aplicados no revestimento de paredes e tetos de uma sala em estudo. Pretendeu-se avaliar a influência da incorporação de PCMs com temperaturas de fusão elevadas na variação de temperaturas interiores na estação de aquecimento. Verificou-se que, a evolução da temperatura interior do espaço com PCMs sofre um desfasamento relativamente à curva de referência, acompanhado de um amortecimento da temperatura interior, atingindo um pico máximo próximo da zona de conforto. Com a aplicação de PCMs com temperaturas de fusão baixas evidencia-se a capacidade de armazenamento obtendo-se indiretamente um ganho térmico significativo e um desfasamento temporal entre as duas curvas, o que se traduz na localização do máximo de temperaturas interiores num horário mais favorável ao conforto interno da sala. Da análise paramétrica realizada sobre a parede de trombe, constatou-se que a solução otimizada depende do tipo de materiais empregues e das respetivas dimensões. Com aplicação desta estratégia passiva na sala em estudo consegue-se obter um aumento do valor da fração solar significativa que se traduz numa diminuição das necessidades de aquecimento. Conseguiu-se assim alcançar o objetivo primordial deste trabalho que consistia em evidenciar a possibilidade de diminuição da dependência energética do edifício, com recurso a soluções passivas.



**keywords**

Energy efficiency, passive solar systems, phase change materials (PCM), Trombe wall, heat energy storage.

**Abstract**

Given the increasing use of electricity in buildings, capacity constraints on the increase of electricity generation, overdependence on fossil fuels to produce electricity, there is a urgent need to achieve energy efficiency in buildings. It is fundamental new design approaches for buildings resourcing to less use of electricity and fulfil their energy needs entirely from renewable sources, thus opening the way for the paradigm of use of passive systems. The importance attached to this urgent need to find energy-efficient solutions has led to several research programs oriented towards the conservation and storage of energy through the development of new materials and construction techniques. In particular, with regard to the development of new materials with better thermal performance, numerous studies have been done on phase change materials (PCM) and their applicability in construction. This thesis presents a study on the incorporation of PCM panels into partition walls and suspended ceilings in an open space study room. It was intended to evaluate the influence of incorporation of PCMs with higher melting temperatures in the range of indoor temperatures in the heating season. It was found that the temporal evolution of indoor temperature of the space with PCMs suffers a time lag in respect to the reference curve, accompanied by a damping of the indoor temperature, reaching a peak near the comfort zone. With the application of PCMs with lower melting temperatures, it is evident the storage capacity attaining indirectly a significant heat gain and a time lag between the two curves, which is reflected in the location of the maximum indoor temperatures over a time range favorable to the indoor comfort of the room. From the parametric analysis performed using the Trombe wall, it was found that the optimal solution depends on the type of materials used and the respective dimensions. With the application of this passive strategy in the room under study it can be obtained an significant increase of the solar fraction value , which traduces into a significant decrease in heating requirements. Therefore it is achieved the main goal of this work in revealing the possibility of reducing energy dependence of the building resourcing to passive solutions.



Aos meus pais, Albertina e Joaquim e ao André



## Índice

---





**ÍNDICE GERAL****Júri****Agradecimentos****Resumo****Abstract****Índice geral** XV**Índice figuras** XXI**Índice tabelas** XXVII**Lista de Acrónimos** XXXI**Lista de Símbolos** XXXV**1. Introdução** 3

1.1. Enquadramento 3

1.2. Objeto de estudo 5

1.3. Objetivos do trabalho 5

1.4. Metodologia 6

1.5. Estrutura do texto 7

**2. Enquadramento** 11

2.1. Eficiência energética 11

2.2. Regulamentação e exigências funcionais 13

2.3. Reabilitação térmica 15

2.4. Reforço da envolvente/Inércia térmica 17

2.5. Construção bioclimática 18

2.5.1. Pressupostos exteriores ao edifício 21

2.5.1.1. Localização 22

2.5.1.2. Forma 23

2.5.1.3. Orientação e afastamento 24

2.5.1.4. Vegetação	24
2.5.2. Pressupostos constituintes do edifício	26
2.5.2.1. Envolvente	26
2.5.2.2. Fenestração	27
2.5.2.3. Sombreamento	28
2.5.2.4. Ventilação	29
<b>3. Sistemas Solares Passivos</b>	<b>33</b>
3.1. Ganhos diretos	33
3.2. Ganhos indiretos	35
3.2.1. Paredes de trombe	36
3.2.1.1. Dimensionamento de uma parede de trombe	38
3.2.1.2. Eficácia	44
3.2.2. Paredes de água	45
3.3. Sistemas de ganho isolado	45
3.3.1. Estufas	46
3.3.2. Coletores de ar/termossifão/circuito de convecção	47
<b>4. Sistemas de Arrefecimento Passivo</b>	<b>51</b>
4.1. Ventilação natural	51
4.2. Sombreamento	53
4.3. Arrefecimento pelo solo	53
4.4. Arrefecimento evaporativo	54
4.5. Arrefecimento radiativo	54
<b>5. Materiais Mudança de Fase</b>	<b>59</b>
5.1. Classificação e propriedades dos PCMs	61
5.1.1. PCMs orgânicos	63
5.1.2. PCMs inorgânicos	64
5.1.3. Misturas eutécticas	65
5.1.4. Encapsulamento dos PCMs	65
5.1.4.1. Macroencapsulamento	65
5.1.4.2. Microencapsulamento	66
5.2. Aplicações com recurso de PCMs	67
5.2.1. Painéis de gesso cartonado	70

---

5.2.2. Paineis sandwich	72
5.2.3. Paineis de madeira e betão	73
5.2.4. Envidraçados	73
5.2.5. Proteção solar	74
5.2.6. Betão	75
5.2.7. Tijolos e Blocos	76
5.2.8. Parede de trombe com incorporação de PCMs	76
5.3. Síntese da eficácia de soluções com incorporação de PCMs	79
<b>6. Programas de Análise</b>	<b>83</b>
6.1. PCM Express	83
6.2. Programa SLR_P	85
6.2.1. Método de cálculo	86
6.2.2. Dados climáticos	87
<b>7. Caso de Estudo</b>	<b>93</b>
7.1. Enquadramento	93
7.2. Caracterização do edifício em estudo	93
7.2.1. Compartimento analisado	96
7.2.1.1. Configuração construtiva	96
7.3. Análise da eficiência da aplicação de PCMs	97
7.3.1. Resultados	100
7.3.1.1. Controlo do Sobreaquecimento	101
7.3.1.2. Armazenamento e Inércia	103
7.3.1.3. Solução de compromisso	106
7.4. Avaliação da contribuição térmica de uma parede de trombe com recurso ao programa SLR_P	110
7.4.1. Edifício Modelo	111
7.4.1.1. Calculo Térmico do Edifício Modelo	112
7.4.2. Análise da influência da espessura da parede de armazenamento no ganho térmico da parede de trombe	117
7.4.3. Análise da influência do material de caixilharia no ganho térmico da parede de trombe	119
7.4.4. Análise da influência do tipo de vidro no ganho térmico da parede de trombe	120
7.4.5. Análise da área da parede de armazenamento no ganho térmico da parede de trombe	122

7.4.6. Análise da sala de estudo com parede de trombe	123
<b>8. Conclusões</b>	<b>129</b>
8.1. Principais conclusões	129
8.1.1. Estratégias passivas	129
8.1.2. Materiais mudança de fase	130
8.1.3. Caso de estudo	131
8.1.4. Conclusões finais	132
8.2. Perspetivas de trabalho futuro	132
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>137</b>
<b>Anexo 1. Controlo do sobreaquecimento</b>	<b>143</b>
<b>Anexo 2. Armazenamento e inércia</b>	<b>149</b>
<b>Anexo 3. Solução de compromisso</b>	<b>153</b>

## Índice de Figuras

---



## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Quantidade de calor Q (em percentagem) que um edifício perde, em diversos posicionamentos, sob a influência dos fatores A,B ou C [30]	22
Figura 2: Efeitos aerodinâmicos provocados pelos ventos dominantes [30]	23
Figura 3: Esquema representativo da relação entre a altura solar e a cêrcea de construção [30]	24
Figura 4: Comportamento da temperatura nas zonas verdes e zonas densamente edificadas [30]	25
Figura 5: Representação esquemática da variação da radiação solar em janelas de diferentes orientações [30]	28
Figura 6: Representação esquemática de um sistema de ganho direto [32]	34
Figura 7: Representação esquemática de um sistema de ganho indireto [32]	36
Figura 8: Casa Schäffer, Porto Santo (Com Paredes de Trombe) Arqº. Günther Ludewig [29]	37
Figura 9: Esquema de funcionamento de uma parede de trombe [39]	37
Figura 10 : Representação esquemática do funcionamento de uma parede de trombe e a evolução das suas linhas de temperatura [30]	38
Figura 11: Representação esquemática da influência dos materiais e cores de uma fachada na evolução diária das suas temperaturas [30]	41
Figura 12: Representação esquemática de sistema de ganho isolado [29]	46
Figura 13: Escola Ferreira do Zêzere com estufa [29]	46
Figura 14: Vista exterior de um coletor de ar [29]	47
Figura 15: Pormenor de funcionamento de Chaminé Solar [1]	52
Figura 16: Sistema de arrefecimento do ar através de tubos enterrados [51]	54
Figura 17: Comportamento dos materiais de mudança de fase em termos de calor específico e entalpia [53]	60
Figura 18: Classificação dos materiais de armazenamento de energia [59]	61
Figura 19: Macroencapsulamento de PCMs [63, 64]	66
Figura 20: Processos de microencapsulamento [61, 65]	66
Figura 21: Microencapsulamento com cápsula polímera [64]	67
Figura 22: Localização da aplicação e função dos PCMs em edifícios [61, 68]	69
Figura 23: Comparação dos resultados de temperaturas obtidas para uma solução com e sem incorporação de PCM [74]	72
Figura 24 : Esquema representativo da janela desenvolvida por Weinlader [61, 80]	74
Figura 25: Células de teste em betão com incorporação de PCMs [81]	75
Figura 26: Esquema que estabelece a equititude de três possíveis soluções [93]	79
Figura 27: Placas de gesso cartonado com PCMS [61]	84

Figura 28: Departamento de Engenharia Civil no Campus Universitário de Santiago	93
Figura 29: Sala em análise no 2º piso do Departamento de Engenharia Civil	96
Figura 30: Curva DSC do PCM com temperatura de fusão de 18°C	98
Figura 31: Curva adaptada pelo programa <i>PCM Express</i> para uma solução com PCM com temperatura de fusão de 18°C	99
Figura 32: Curva DSC do PCM com temperatura de fusão de 16°C	99
Figura 33: Curva adaptada pelo programa <i>PCM Express</i> para uma solução com PCM com temperatura de fusão de 16°C	99
Figura 34: Distribuição de temperaturas para o dia mais quente com as diferentes combinações de utilização de PCMs	101
Figura 35: Evolução das temperaturas interiores e exteriores, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 26	102
Figura 36: Distribuição de temperaturas para o dia mais frio com as diferentes combinações de utilização de PCMs.	104
Figura 37: Evolução das temperaturas interiores e exteriores, durante o período mais frio.com a aplicação de PCM 16/18	105
Figura 38: Distribuição de temperaturas para o dia mais quente com as diferentes combinações de utilização de PCMs	106
Figura 39: Distribuição de temperaturas para o dia mais frio com as diferentes combinações de utilização de PCMs	107
Figura 40: Evolução das temperaturas interiores e exteriores, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 16/26	108
Figura 41: Evolução das temperaturas interiores e exteriores, durante o período mais frio com a aplicação de PCM 16/26	109
Figura 42: Balanço de perdas do edifício modelo	115
Figura 43: Balanço de perdas: parede de trombe de 20 cm	116
Figura 44: Balanço de perdas: parede de trombe de 10 cm	118
Figura 45: Balanço de perdas: parede de trombe com caixilharia de madeira	119
Figura 46: Balanço de perdas: parede de trombe com vidro simples	121
Figura 47: Balanço de perdas: parede de trombe ocupando 100% da fachada	122
Figura 48: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 26/23	145
Figura 49: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 21/23	145
Figura 50: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 26/21	146
Figura 51: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 23/26	146



Figura 52: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 21/21	147
Figura 53: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 21/26	147
Figura 54: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 23/21	148
Figura 55: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 23/23.	148
Figura 56: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais frio com a aplicação de PCM 18/18	151
Figura 57: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais frio com a aplicação de PCM 18/16	152
Figura 58: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais frio com a aplicação de PCM 16/16	152
Figura 59: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 26/18	155
Figura 60: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 16/21	156
Figura 61: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 21/16	157
Figura 62: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 20/18	158
Figura 63: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 23/18	159
Figura 64: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 16/21	160
Figura 65: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 23/16	161
Figura 66: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 16/23	162
Figura 67: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 18/23	163
Figura 68: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 26/16	164



## Índice de Tabelas

---



## ÍNDICE TABELAS

Tabela 1: Critérios para o dimensionamento de uma parede de trombe em função das condições climáticas de inverno e a superfície útil a aquecer [40]	40
Tabela 2: Efeito da espessura da parede de trombe sobre a amplitude das oscilações da temperatura interior [40]	40
Tabela 3: Classificação e características de alguns PCMs [33, 60]	62
Tabela 4: Temperaturas de mudança de fase e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns PCMs parafínicos [61]	64
Tabela 5: Propriedades do PCM SmartBoard [61]	84
Tabela 6: Caracterização da envolvente do compartimento em análise	98
Tabela 7: Dados climáticos do <i>software SLR_P</i>	111
Tabela 8: Descrição da envolvente: edifício modelo	113
Tabela 9: Descrição da cobertura: edifício modelo	114
Tabela 10: Descrição do pavimento: edifício modelo	114
Tabela 11: Contabilização da fração de ganho solar do edifício modelo	115
Tabela 12: Descrição da envolvente: parede de trombe de 20 cm	116
Tabela 13: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe de 20 cm	117
Tabela 14: Descrição da envolvente: parede de trombe de 10 cm	117
Tabela 15: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe de 10 cm	118
Tabela 16: Descrição da envolvente: parede de trombe com caixilharia de madeira	119
Tabela 17: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe com caixilharia de madeira	120
Tabela 18: Descrição da envolvente: parede de trombe com vidro simples	120
Tabela 19: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe com vidro simples	121
Tabela 20: Descrição da envolvente: parede de trombe ocupando 100% da fachada	122
Tabela 21: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe ocupando 100% da fachada	122
Tabela 22: Coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos	123
Tabela 23: Descrição da envolvente: sala em estudo	124
Tabela 24: Descrição da cobertura: sala em estudo	124
Tabela 25: Descrição do pavimento: sala em estudo	124
Tabela 26: Balanço de perdas: sala em estudo	125
Tabela 27: Contabilização da fração de ganho solar: sala em estudo	125
Tabela 28: Descrição da envolvente: sala com parede de trombe	125
Tabela 29: Balanço de perdas: sala com parede de trombe	126
Tabela 30: Contabilização da fração de ganho solar: sala com parede de trombe	126



## **Lista de Acrónimos**

---





## LISTA DE ACRÓNIMOS

CE	Comunidade Europeia
CEE	Comunidade Económica Europeia
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DSC	Differential Scanning Calorimeter
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EUA	Estados Unidos da América
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
ONG's	Organizações não Governamentais
PCM	Phase Change Materials
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAC	Plano Nacional para as Alterações Climáticas
PNALE	Plano Nacional de Atribuição de licenças de Emissão
RCCTE	Reglamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios
RSECE	Reglamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios
SCE	Sistema Nacional de Certificação Energética e de Qualidade do ar interior nos Edifícios
SGCIE	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia
SLR	Solar Load Ratio
URE	Utilização Racional da Energia



## Lista de Símbolos

---



## LISTA DE SÍMBOLOS

FS	Fração de Ganho Solar
GD	Graus Dias de Aquecimento
Qaux.	Necessidades de aquecimento
Qref	Carga térmica
Qsol	Energia solar absorvida pelo edifício
RH	Radiação Horizontal
RV	Radiação Vertical
Tsolo	Temperatura do solo
U	Coeficiente de transmissão térmica



## **Capítulo 1**

---

Enquadramento, objetivos e estrutura da dissertação





---

# 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório apresenta-se um breve enquadramento do problema a motivação para a sua realização, os seus objetivos, assim como a metodologia e a estrutura adotada.

## 1.1. Enquadramento

A partir da Revolução Industrial ocorreram grandes mudanças tecnológicas com profundo impacto no setor construtivo, tais como o aparecimento da eletricidade, até invenções mais recentes como do ar condicionado e dos sistemas de aquecimento. Esta inovação e desenvolvimento ao nível de equipamentos para os edifícios, acabou por ser induzido, e simultaneamente induzir nos utilizadores, um aumento progressivo da procura de maior conforto, o que aliado a um maior nível de bem-estar económico acabou por propiciar o crescimento gradual das necessidades energéticas [2].

A preocupação com a utilização racional de energia nos edifícios surgiu, com a primeira crise internacional do petróleo. Até esta data, em toda a Europa, não existiam políticas nem preocupações ao nível do uso racional de energia nos edifícios uma vez que esta apresentava um custo relativamente baixo [3]. Com efeito, como resultado da crise supracitada, verificou-se um aumento considerável do custo da energia, o que levou à necessidade de uma redução significativa do seu consumo global nos edifícios. As políticas energéticas definidas nesse período focalizaram-se sobretudo no aumento do isolamento da envolvente do edifício e na redução das infiltrações de ar. Estas medidas, embora tenham originado uma diminuição da fatura energética, não foram suficientes. Atualmente, existe ainda um consumo excessivo de energia, pelo que é cada vez mais importante sensibilizar para as preocupações ambientais e a eficiência energética.

Num contexto global, em 1990 inicia-se a era da “eficiência energética”. Nesta mudança ficou claro que a conservação da energia não se pode dissociar do ambiente interior e exterior e que o conceito global de um edifício surge associado aos aspetos ambientais. Estes aspetos apelam à necessidade de uma integração total das características locais, do design e da orientação do edifício, para que se possa levar a cabo

a aplicação de técnicas passivas para o seu aquecimento, arrefecimento, ou melhor, para a sua climatização interior.

Sobretudo os habitantes do mundo ocidental, têm vindo a tomar consciência de que as fontes de energia são limitadas e de que a sua utilização, de forma massiva, tem tido e continuará a ter um grande impacto ambiental no nosso ecossistema “Terra”, colocando em risco a sua sustentabilidade. Paralelamente, a escassez de recursos e a agitação atual das economias mundiais têm conduzido a um aumento significativo dos custos da energia. Surgem neste quadro, uma série de iniciativas, medidas e pesquisas que contribuem para estimular a eficiência energética e para a otimização da utilização das fontes renováveis como recurso energético.

Um qualquer edifício, mesmo antes de se tornar um consumidor de energia, pode beneficiar no seu interior do melhor do que o clima que o rodeia lhe oferece, alcançando-se assim condições de conforto térmico necessárias aos seus utilizadores sem recurso ao consumo de energia de origem fóssil. Isto é, antes de se recorrer às fontes de energia convencionais, deve-se efetuar o aproveitamento da energia solar, do vento, da vegetação, transformando todas estas fontes de energia renováveis em energia útil, contribuindo simultaneamente para assegurar o conforto e a satisfação das necessidades energéticas para as actividades humanas, devendo-se recorrer às energias convencionais apenas como suplemento daquelas.

Em muitos países, a radiação solar direta é considerada uma das maiores fontes potenciais de energia. Os cientistas de todo o mundo estão em busca de fontes de energia novas e renováveis. Uma das opções é desenvolver dispositivos de armazenamento de energia, que são tão importantes como o desenvolvimento de novas fontes de energia. O adequado armazenamento de energia solar, que pode ser convertida em convencional na forma requerida, é um desafio atual. O armazenamento de energia não só reduz o desequilíbrio entre oferta e necessidade, mas também melhora o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de energia e desempenha um papel importante na conservação de energia [4].

Quando se trata de edifícios já existentes, a implementação de medidas que permitam a otimização das condições naturais exteriores para se obter o conforto térmico interior é uma tarefa mais complexa, uma vez que os edifícios, construídos antes da legislação contemplar a eficiência energética e os requisitos térmicos, podem vir a

exigir mudanças estruturais que se tornem mais exigentes e dispendiosas. Não obstante, a reabilitação térmica de edifícios existentes é uma questão de grande prioridade na agenda atual, tendendo a ser num curto prazo um ramo de atividade cada vez mais importante para o setor da construção.

Associado a estes factos, vive-se atualmente uma grave crise económico-financeira que veio expor a fragilidade do mercado da construção, já em queda há alguns anos. Desde 2001 que este mercado tem vindo a constituir um dos setores mais penalizados por esta recessão económica, com evidentes sinais de agravamento.

Face ao panorama atual, de maior consciencialização ambiental dos mercados e de uma recessão económica sem precedentes no setor da construção, crê-se que a reabilitação e certificação energética do parque edificado existente, se venha a tornar num imperativo nacional a curto prazo. Uma vez que a renovação do parque construído em Portugal é de cerca de 2% ao ano, concluiu-se que existe ainda um enorme potencial de melhoria na economia do setor energético e na integração de energias renováveis em relação às necessidades de reabilitação dos edifícios existentes.

Este trabalho surge na sequência desta constatação, no qual se tenciona investigar as possibilidades de reabilitação energética de edifícios existentes, com soluções passivas. Procura-se avaliar o nível de eficiência energética alcançado com aplicação de soluções como a parede de trombe e os materiais mudança de fase.

## **1.2. Objeto de estudo**

Considerando o desafio que constitui a reabilitação energética de edifícios existentes, o objeto de estudo do presente trabalho centra-se na melhoria da eficiência energética de um edifício escolar do Campus Universitário da Universidade de Aveiro através da introdução de medidas de construção passiva.

## **1.3. Objetivos do trabalho**

O presente trabalho tem como finalidade avaliar a influência da utilização de PCMs e paredes de trombe na reabilitação térmica de edifícios. Desta forma, pretende-se contribuir para o aumento do conforto interior e da eficiência energética nos edifícios, através da utilização de técnicas passivas de controlo climático.

Pretende-se explorar as potencialidades (regulação da temperatura, conservação da energia e deslocalização temporal do consumo energético) da aplicação de um material de mudança de fase (PCM) num edifício de serviços.

Estudar o efeito da sua incorporação, sob a forma de placas de gesso cartonado no revestimento interior de paredes e tetos, no ambiente interior de edifícios de serviços, avaliar a influência da sua aplicação, na estação de arrefecimento e aquecimento, aplicando PCMs com diferentes temperaturas de fusão.

Quanto à parede de trombe o objetivo é analisar a influência dos diversos componentes no armazenamento térmico deste elemento, através da simulação de um edifício modelo no qual se aplica este sistema solar passivo, de modo a encontrar a solução otimizada, de forma a perspetivar os ganhos térmicos que se alcançariam, no edifício objeto de estudo, com a aplicação desta solução na estação de aquecimento.

#### **1.4. Metodologia**

De modo a atingir os objetivos referidos iniciou-se este trabalho com a pesquisa bibliográfica relativa à temática em estudo.

Para a análise dos principais efeitos da incorporação de materiais mudança de fase, optou-se pela realização de três análises distintas de uma das salas do edifício estudado:

- Aplicação de PCMs com temperatura de transição elevadas, 21, 23 e 26 °C, nas paredes e tetos do compartimento de modo a simular o seu comportamento na estação de arrefecimento;
- Aplicação de PCMs com temperaturas de transição mais baixas, 16 e 18 °C, nas paredes e tetos do compartimento, para simular o seu efeito nas temperaturas interiores durante a estação de aquecimento;
- Conjugação dos PCMs de baixas e elevadas temperaturas, de modo a construir uma solução de compromisso que desse resposta às necessidades de verão e inverno.

Em todas as análises foram realizadas diversas simulações onde se conjugaram os diferentes tipos de PCMs, de modo a encontrar a combinação mais eficiente.

Como *software* de apoio das simulações, foi utilizado o programa *PCM Express*, baseado nos dados climáticos do *Meteonorm*, que apresenta resultados de distribuições

de temperaturas interiores da solução existente, da solução com introdução dos PCMs, conjugadas com a distribuição de temperaturas exteriores.

Para analisar os ganhos térmicos conseguidos com a aplicação de uma parede de trombe no caso de estudo, tentou-se primeiro encontrar a solução mais eficiente.

Desta forma realizaram-se uma série de simulações da aplicação de uma parede de trombe num edifício modelo, tendo-se analisado os ganhos térmicos provenientes da mudança dos materiais constituintes da parede de trombe, a partir dos quais foi possível encontrar a solução ideal, que poderia ser aplicada no caso de estudo. Em todas estas análises foi utilizada como ferramenta de apoio o programa *SLR\_P*.

### **1.5. Estrutura do texto**

O presente trabalho encontra-se dividido em nove capítulos, incidindo os cinco primeiros sobre a análise bibliográfica de diferentes temas que justificam e suportam o trabalho desenvolvido posteriormente. Nos capítulos seis e sete é desenvolvida a metodologia empregue no trabalho, e efetuada a análise de resultados. No capítulo oito procura-se apresentar uma solução que conjugue os dois sistemas estudados. No capítulo nove são apresentadas as conclusões finais e as perspetivas futuras de desenvolvimento do trabalho.

De seguida apresenta-se a descrição resumida de cada um dos capítulos.

O capítulo 1. Introdução, procura justificar o tema desenvolvido e a sua relevância a nível ambiental, nomeadamente na redução das emissões dos GEE e no aumento da eficiência energética do edificado.

Após a Introdução, segue-se o capítulo 2. Eficiência Energética e Reabilitação Térmica, no qual se revêm os principais conceitos desta matéria. Baseia-se, portanto, na pesquisa bibliográfica, com particular incidência em documentos normativos, quer da Comissão Europeia, quer da própria República Portuguesa. Recorrendo, ainda, a uma pesquisa bibliográfica da especialidade, que relaciona os conceitos de Construção Bioclimática e de Eficiência Energética.

Desta forma, estão criadas as condições para se estudar a importância dos sistemas passivos no tocante à Eficiência energética e Sustentabilidade. É neste contexto que se insere o capítulo 3. Sistemas Solares Passivos e o capítulo 4. Sistemas e Arrefecimento

Passivo. Nestes dois capítulos descrevem-se os principais sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento. No capítulo 3, dá-se maior ênfase à parede de trombe, uma vez que um dos objetivos deste trabalho consiste no estudo dos ganhos térmicos conseguidos com este elemento, e descreve-se um possível método para o seu dimensionamento, acompanhado com a caracterização de todos os elementos que a constituem.

Após o conhecimento destes sistemas à muito estudados, mas que ainda aguardam a sua forte aplicação na construção/reabilitação de edifícios, apresenta-se o Capítulo 5. PCMs, materiais inovadores, com aplicação crescente, futuramente, na construção. Neste capítulo realiza-se a caracterização dos PCMs, e uma breve revisão da sua aplicação. Apreendidos os conceitos teóricos básicos para uma análise consistente do problema em questão, passa-se para a apresentação dos programas utilizados na simulação dos casos específicos em estudo.

O capítulo 6, Programas de análise, caracterizam o programa *PCM Express*, utilizado na simulação dos PCMs, e o programa *SLR\_P*, na simulação da aplicação da parede de trombe.

Com os conceitos teóricos apresentados e o conhecimento dos programas de simulação, passa-se ao caso de estudo, capítulo 7. Através da análise de um compartimento de um edifício escolar, avaliam-se as potencialidades da aplicação de PCMs e de paredes de trombe na melhoria do conforto térmico interior do edifício, cumprindo os propósitos dos capítulos 3 e 5: aplicação de sistemas passivos na melhoria da eficiência térmica. Para esta mesma análise, recorre-se aos programas anteriormente apresentados, *PCM Express* e *SLR\_P*. Neste capítulo apresentam-se também os resultados alcançados nas diversas simulações, para as diferentes combinações de PCMs, e a aplicação da parede de trombe, que permitem a discussão e análise dos dados obtidos relacionando com os conceitos teóricos abordados nos capítulos iniciais.

Perante os resultados obtidos no caso de estudo, resta apresentar o capítulo 8. Conclusões.

Por fim, apresentam-se os Anexos, onde são apresentados todos os resultados obtidos nas simulações realizadas com os PCMs.

## **Capítulo 2**

---

Eficiência energética e Reabilitação térmica





---

## 2. ENQUADRAMENTO

Este capítulo da dissertação é dedicado à discussão teórica de um conjunto de conceitos chave que se revelaram imprescindíveis para a prossecução dos objetivos definidos para o presente trabalho.

Deste modo, numa primeira parte abordam-se os principais conceitos sobre a eficiência energética, de seguida analisa-se a respetiva regulamentação em vigor, para que se possam resumir a estratégia europeia e nacional no âmbito da certificação energética.

Posteriormente procede-se à descrição sucinta de conceitos como a reabilitação térmica e a construção bioclimática que servem de ponto de partida para o desenvolvimento desta dissertação.

Como tal, neste capítulo não se procura abordar extensivamente todos os regulamentos e conceitos nesta área. Procura-se, antes, apresentar alguma da informação existentes, de modo que esta tese venha na sua sequência, melhorar, assim, os conhecimentos sobre a eficiência energética e construção bioclimática.

### 2.1. Eficiência energética

A eficiência energética pode ser definida como a “otimização do consumo de energia”, o que pressupõe a implementação de estratégias e medidas para combater o desperdício de energia desde que é transformada até que é utilizada. Antes de se transformar em calor, frio, movimento ou luz, a energia sofre um percurso mais ou menos longo de transformação, durante o qual uma parte é desperdiçada e a outra, que chega ao consumidor, nem sempre é devidamente aproveitada[5].

A energia existe na natureza em diferentes formas e para ser utilizada necessita de ser transformada. Durante essa transformação, parte da energia perde-se, gerando desperdícios prejudiciais para o ambiente. Parte destas perdas é inevitável e deve-se a questões físicas, mas outra parte é perdida por mau aproveitamento e falta de otimização dos sistemas[6].

A procura de melhores condições de conforto térmico e a maior utilização de equipamentos nos edifícios, geralmente de fraca eficiência energética, agravam as

emissões de GEE (gases com efeito de estufa) tornando o sector da construção, um dos maiores responsáveis em termos de impacto económico e ambiental[7].

A eficiência energética é frequentemente associada ao termo "Utilização Racional da Energia" (URE), que pressupõe a adoção de medidas que permitem uma melhor utilização da energia, tanto no sector doméstico, como nos sectores da indústria e dos serviços [5]. Através da escolha, aquisição e utilização adequada dos equipamentos, e da adoção de soluções passivas é possível alcançar poupanças de energia significativas, manter o conforto e garantir a qualidade do ar interior dos edifícios [8].

Nesse contexto, têm-se multiplicado as iniciativas para a promoção da eficiência energética. Empresas, governos e ONG's (Organizações não Governamentais) por todo o mundo, têm investido fortemente na melhoria dos processos e na pesquisa de novas tecnologias energéticas (mais eficientes e amigas do ambiente) ou no melhor aproveitamento das energias renováveis [8].

A diversificação das fontes energéticas e a otimização da eficiência energética são opções para garantir que o crescimento contínuo do consumo de energia (inerente ao desejo de um maior desenvolvimento económico) não venha a corresponder necessariamente a um aumento dos efeitos nocivos, quer para a humanidade, quer para o sistema ecológico [9].

Em 2005, Portugal importou 87,2% da energia consumida. Desta quota, 58,7% corresponde a energia derivada do petróleo, uma parcela significativa e que podia ser diminuída se se tirasse melhor partido dos benefícios que a respetiva localização geográfica concede [10, 11]. Com efeito, Portugal é um dos países europeus com maiores potencialidades para o aproveitamento de recursos energéticos renováveis, como é o caso da energia solar, eólica e das marés. A implementação de ações estruturantes e sustentadas neste domínio, bem como no da utilização racional e eficiente da energia, são decerto as duas formas capazes de inverter a evolução e a tendência de crescimento da intensidade da utilização de energia em Portugal [9, 12].

Assim sendo, o grande consumo de energia nos edifícios continuará a ser uma realidade até que os edifícios sejam projetados para equilibrar os seus consumos, isto é, serem autossuficientes, de modo a produzirem o necessário para o seu funcionamento e utilização [13]. Para isso concorrem uma série de fatores de simples aplicação, implementados maioritariamente de forma isolada e que, se forem corretamente

conjugados, podem levar a uma redução de cerca de 30% das necessidades energéticas do edifício [10].

Estas projeções assinalam a necessidade atual de se alterar o paradigma da construção, com maior aposta na adoção de estratégias e sistemas de aproveitamento das energias renováveis disponíveis. A questão que se coloca é a de que esta mudança de comportamentos/atitude necessita de partir da origem, isto é, da fase inicial da conceção dos projetos, envolvendo a própria equipa de projetistas, cuja sensibilização para esta necessidade começa apenas hoje a ser valorizada. Torna-se pois essencial que desde a fase inicial do projeto de arquitetura se tenha em conta a importância da escolha da melhor implantação do edifício, da melhor orientação e localização das zonas envidraçadas, da melhor projeção de sombreamentos, entre outros.

Esta atitude pró-ativa e não reativa é pertinente se considerarmos que a implementação de medidas de eficiência energética numa fase posterior à construção dos edifícios se torna mais complexa e mais onerosa. Um edifício mais eficiente, não só reduz o consumo de energia, como também proporciona um aumento do conforto interior não ficando tão vulnerável às oscilações dos custos energéticos [14]. Os ganhos perspectivados são elevados, não só em termos económicos, mas também ambientais ao considerar-se que com menores consumos de energia de origem fóssil, reduzem-se as emissões de gases de efeito de estufa, nomeadamente de dióxido de carbono para a atmosfera, o que em última análise irá contribuir para o alcance das metas a que Portugal se propôs no âmbito do protocolo de Quioto [10].

## **2.2. Regulamentação e exigências funcionais**

A União Europeia tem procurado respostas para a problemática da eficiência energética, com a produção de medidas e planos estratégicos, acompanhados por Diretivas Europeias que pretendem ter um grande impacto ao nível da melhoria da Eficiência Energética dos Edifícios, do desenvolvimento das Energias Renováveis e da diminuição dos gases de efeito de estufa [7].

Em 1995, entrou em vigor a Diretiva 93/76/CEE (SAVE) da Comunidade Económica Europeia (CEE), atual Comunidade Europeia (CE), com a preocupação e objetivo de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, como consequência do consumo de energia

no sector da edificação. Surgia já implícita uma metodologia de Certificação Energética, contudo ainda sem programas de cálculo definidos para a sua implementação[15].

Aproximadamente uma década depois, surge a Diretiva 2002/91/CE (EPBD) - Desempenho Energético dos Edifícios. De acordo com esta norma, Portugal tinha de avaliar os requisitos nacionais de desempenho energético de edifícios novos até 2011, o que se revelou uma excelente oportunidade para elaborar uma estratégia nacional de controlo dos requisitos mínimos de desempenho energético e o que acabou por se traduzir em novos regulamentos energéticos para edifícios [7, 16].

A Diretiva nº 2002/91/CE foi transposta em 2006 para a ordem jurídica nacional através de um pacote legislativo composto por três Decretos-Lei.

O Decreto-lei nº 78/2006 de 4 de Abril, aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE). Em conjunto com os regulamentos técnicos aplicáveis aos edifícios de habitação (RCCTE, DL 80/2006) e aos edifícios de serviços (RSECE, DL 79/2006), o SCE define regras e métodos para verificação da aplicação efetiva destes regulamentos às novas edificações, bem como aos imóveis já construídos [17].

A Diretiva 2006/32/CE, relativa à Eficiência na Utilização Final de Energia e Serviços Energéticos, tem por objetivo aumentar a eficiência do uso final da energia e aplica-se aos distribuidores de energia, operadores de sistemas de distribuição e empresas de venda de energia, bem como aos utilizadores finais [18].

Existem ainda outros diplomas em vigor na área da eficiência energética que já incluem disposições relevantes no âmbito de aplicação da Diretiva n.º 2006/32/CE, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de Abril, que criou o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) com o objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações consumidoras intensivas de energia [19].

Neste âmbito, assume igualmente especial relevância o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) - Portugal Eficiência 2015, aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008, de 20 de Maio, que contempla um conjunto de medidas com o objetivo de alcançar até 2015 uma melhoria da eficiência energética equivalente a 10% do consumo final de energia, antecipando o prazo e ultrapassando a meta previstos na Diretiva n.º 2006/32/CE [19].

O PNAEE, orientado para a gestão da procura energética, encontra-se articulado com o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC) e com o Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão (PNALE).

Foi ainda anunciada a Estratégia Nacional para a Energia, com horizonte de 2020 (ENE 2020). A presente estratégia assume como marca institucional Re.New.Able. - Novas Energias a inspirar Portugal [19].

Em Maio de 2010 foi aprovada a Diretiva 2010/31/UE do parlamento europeu e do conselho, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Esta diretiva vem introduzir reformulações substanciais ao emanado da Diretiva 2002/91/CE. Com efeito, a diretiva em análise acaba por surgir com um conjunto requisitos mais alargados e com medidas de verificação mais rigorosas, sendo o principal objetivo da sua aplicação o desenvolvimento de planos nacionais para aumentar o número de edifícios com necessidades praticamente nulas de energia. Os Estados Membros deverão assim assegurar que, até 31 de Dezembro de 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia e que, após 31 de Dezembro de 2018, os edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas, sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia [20].

Por fim, refira-se ainda a norma *passivhaus*, criada em 1995 e baseada na experiência obtida nos primeiros casos de estudo, em que se aplicou o método do desenho passivo a casas na Alemanha. Após o sucesso das casas realizadas pela aplicação desta norma na Alemanha e em alguns outros países da Europa, o consórcio ‘*Passive-On*’ elaborou uma proposta de revisão para a aplicação da norma *passivhaus* em climas quentes da Europa, com critérios e limites adaptados às características e requisitos destes climas. A norma *passivhaus* já foi aplicada em Portugal na construção de uma casa modelo [21].

### **2.3. Reabilitação térmica**

Atualmente a reabilitação energética de edifícios constitui uma preocupação crescente dos organismos nacionais e internacionais, como resultado de uma maior consciencialização da necessidade de uma política estratégica orientada para a eficiência energética [22].

Apesar do elevado número de construções novas verificada nos últimos anos, o parque edificado português é ainda, e sobretudo, um parque envelhecido. Grande parte

dos edifícios apresenta patologias graves que exigem intervenções profundas de modo a assegurar a manutenção das características que permitem a sua utilização. O maior constrangimento que hoje se enfrenta reside, precisamente, no facto de praticamente todos estes edifícios terem sido construídos antes da existência de regulamentação térmica de edifícios, pelo que apresentam uma deficiente qualidade térmica e energética, o que em última análise se traduz em envolventes com um isolamento térmico insatisfatório [1]. Não obstante, há neste quadro do edificado nacional uma vantagem considerável que reside no facto de estes edifícios terem sido maioritariamente construídos anteriormente à era de aplicação dos sistemas de climatização mecânicos, revelando por isso uma arquitetura favorável ao uso de estratégias passivas. As soluções construtivas e os materiais utilizados na altura eram de energia incorporada reduzida, o que acaba por ser propício a uma reabilitação com menores custos, mas também com menores impactos energéticos e ambientais[23].

É possível obter soluções passivas que se enquadrem harmoniosamente com a arquitetura das fachadas. Da mesma forma, a realização de estudos mais aprofundados, possibilitará aos projetistas obter soluções mais adequadas e de mais fácil aplicação no processo de reabilitação [22].

No panorama da reabilitação, estima-se que a introdução de mecanismos bioclimáticos possa vir a custar em média mais 30% do que se estes tivessem sido implementados aquando da construção do edifício [1, 24]. No entanto, deve-se ter em conta que o resultado final da aplicação de mecanismos bioclimáticos por via da reabilitação de edifícios é em grande parte das situações muito vantajoso, devido à significativa redução dos consumos energéticos.

A reabilitação térmica dos edifícios deve ser, cada vez mais, uma matéria de interesse e aplicação uma vez que constitui a solução mais promissora para a correção de situações de inadequação funcional, proporcionando a melhoria da qualidade térmica e das condições de conforto dos seus edifícios, com redução dos impactes resultantes do excesso de ocupação do solo, da dependência energética nacional e da intensidade energética da economia do país [25].

Quando se analisa um edifício para uma possível reabilitação térmica não se pode apenas ter em conta o grau de deterioração do mesmo. Na verdade, devem-se também considerar as características atuais do edifício e os comportamentos dos seus habitantes,

dado que o seu comportamento pode ser o elemento chave para compreender a redução do desempenho térmico do edifício [22, 26].

As soluções existentes para a intervenção nos diferentes elementos da envolvente, apresentadas anteriormente, devem ser sempre analisadas caso a caso, de modo a que os benefícios ao nível da redução dos consumos de energia, da melhoria do conforto térmico e da qualidade do ambiente interior sejam enquadrados tanto quanto possível em relação às principais características construtivas e arquitetónicas de cada edifício [26].

## **2.4. Reforço da envolvente/Inércia térmica**

Segundo Ramos (2002) [2], a inércia térmica de um edifício é a menor ou maior capacidade que este tem para armazenar e amortecer o efeito da onda de calor a que é sujeito, refletindo por sua vez a sua capacidade de manter estável e confortável o seu ambiente interior. Esta estabilidade térmica é dependente da capacidade dos elementos maciços absorverem e armazenarem energia térmica de forma muito lenta, possibilitando assim que os extremos de temperaturas exteriores não sejam perceptíveis no interior [27, 28].

A situação ideal seria a possibilidade de se construir um edifício com inércia térmica infinita, pois desta forma não existiriam variações das temperaturas interiores, mantendo-se por isso constantes. Quando um edifício tem uma inércia muito baixa, a variação de temperaturas interiores é próxima das exteriores, não existindo conforto térmico.

No inverno um espaço com grande inércia térmica tem a capacidade de armazenar uma parcela da energia térmica incidente, libertando-a quando necessário, enquanto no verão funciona como uma espécie de esponja que absorve o excesso de calor interior e liberta-o quando existem temperaturas mais baixas com o auxílio de uma correta ventilação natural [2].

Na realidade, para que os componentes construtivos tenham uma boa capacidade térmica é necessário que estes apresentem uma boa massa (pesados) e tenham características pouco condutoras [2, 27].

A inércia térmica é assim uma estratégia importante a conciliar com os sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento de forma a proporcionar a máxima eficácia e rendimento dos sistemas na obtenção do conforto no interior do espaço a habitar [2, 27].

## **2.5. Construção bioclimática**

A construção bioclimática consiste na conceção de um edifício com base nas características ambientais e na envolvente climatérica do local em que este se insere. Esta opção de construção concorre para que se alcancem as condições de conforto mais desejáveis no interior do edifício, a nível térmico, acústico e luminoso, partindo apenas do design e dos elementos arquitetónicos disponíveis. Um edifício concebido a partir dos princípios de arquitetura bioclimática possui uma identidade própria, pois para cada local é necessário desenvolver soluções para dar resposta às necessidades programáticas, ficando adaptado às características ambientais e aos aspetos socioeconómicos e culturais locais. O objetivo máximo é que o edifício seja energeticamente eficiente, que se alcance facilmente os níveis de conforto desejados tendo em conta um baixo consumo de energia [1].

Os princípios da construção bioclimática não são mais do que um conjunto de regras que regulam o melhor enquadramento do edifício no seu contexto, de modo a alcançar o equilíbrio pretendido entre os vários elementos a considerar em todo seu processo de conceção, execução e exploração.

O conceito de arquitetura bioclimática não é inovador ou recente. Na sua índole, o conceito foi desenvolvido tendo por base o conhecimento empírico integrado nas boas regras dos primórdios da construção, numa época em que não existiam tecnologias que dessem resposta às necessidades de climatização e iluminação, tendo-se desenvolvido métodos de construção eficiente com o aproveitamento das condições do clima circundante [1].

Algumas casas na região do Alentejo apresentam ainda hoje este tipo de soluções. A sua disposição em banda, com ruas estreitas, permite um maior sombreamento dos edifícios. Da mesma forma, a opção por paredes grossas, caiadas ou pintadas de branco, conferem-lhe uma maior inércia térmica e menor absorção da radiação solar. Pode-se constatar deste exemplo que a partir de medidas simples, e sem o recurso a sistemas



tecnológicos complexos, é possível alcançar um maior conforto térmico no interior do edifício tendo em conta situações naturais adversas do exterior [1]. Por isso se conclui que a construção bioclimática surge apenas como um novo rótulo que recentemente se adota para denominar algumas atitudes/opções de construção que, mais conscientes das oportunidades da envolvente se podem tomar no processo de conceção do edificado [1].

O sol é um dos principais elementos a considerar na adaptação às características ambientais locais, uma vez que será a fonte de energia, quer em termos térmicos, quer em termos de iluminação. Com o seu devido aproveitamento, será o fator essencial para se alcançar um maior ou menor conforto interior.

O comportamento térmico do edifício será preponderantemente influenciado pelas características bioclimáticas da região e pelos fatores responsáveis por estas, tais como [11]:

- Clima;
- Orientação em função da radiação térmica;
- Ventos dominantes;
- Humidade e a temperatura;
- Radiação;
- Características do terreno de implantação do edifício
  - Topografia;
  - Altitude;
  - Vegetação existente;
  - Recursos;
- Existência ou não de edificações nas proximidades;
- Forma do edifício.

Todos estes fatores devem ser considerados e analisados de modo a otimizar as soluções possíveis e a tirar maior partido das suas potencialidades. O que se pretende é alcançar um sistema construtivo onde as perdas e os ganhos se compensem, tendo em consideração os elementos acima referidos, de modo a obter um bom desempenho ambiental e energético.

Assim, para atenuar as trocas térmicas entre o interior e exterior, é fundamental orientar convenientemente o edifício e fazer o seu isolamento de modo eficiente (preferencialmente pelo lado exterior e de modo contínuo) [29].

Atendendo à situação geográfica de Portugal continental, o quadrante sul é aquele que é mais beneficiado pela incidência da radiação solar ao longo do dia. Esta será então a orientação privilegiada para fazer o aproveitamento dos ganhos solares. Por oposição, o quadrante norte será aquele que recebe menor quantidade de radiação solar direta, chegando mesmo a não receber radiação. Nesta orientação irão assim verificar-se perdas térmicas, daí existir a preocupação de colocar nesta orientação frações do edifício que necessitem de menores ganhos térmicos, isto é, divisões com menor tempo de ocupação.

A nascente verifica-se a radiação solar direta ao longo do período da manhã, contrariamente a poente que só receberá radiação solar direta no período da tarde.

Tendo esta informação como ponto de partida, devem ser desenvolvidas estratégias para fazer o adequado aproveitamento da energia solar, tanto em termos térmicos como em termos de iluminação, reduzindo assim as necessidades energéticas da edificação.

A vegetação existente é outro dos fatores a considerar. A existência de árvores de folha caduca é benéfica na medida em que, no verão, a sua estrutura folhosa protege as superfícies envidraçadas da incidência direta da radiação solar e refresca o ambiente, e, no Inverno, a queda da folhagem permite a entrada dos raios solares, traduzindo-se em ganhos térmicos e aumento do conforto interior [29].

Existe a noção de que uma habitação construída de acordo com estes princípios é necessariamente mais dispendiosa. Isso não é totalmente verdade. Inicialmente pode até representar um investimento maior, mas que ao longo da sua vida útil será recuperado, pois as necessidades de energia serão reduzidas, uma vez que o conforto no seu interior será facilmente alcançado pelos meios passivos, sendo a necessidade de recorrer a aparelhos de climatização menor, poupando-se assim na fatura energética mensal. É esta poupança que ao fim de alguns anos compensará em larga medida a diferença do investimento inicial. Paralelamente, estas opções de construção serão vantajosas numa perspetiva de maior consciencialização ambiental, uma vez que existe uma menor quantidade de emissões de gases de efeito de estufa para o ambiente.

Para que todo o sistema funcione não basta a aplicação simples destes princípios. É importante consciencializar os utilizadores para a necessidade de uma correta utilização

da sua habitação, para que tirem melhor partido dos mecanismos existentes. O seu comportamento, os padrões de ocupação, a forma como o aquecimento/arrefecimento dos espaços é feito, o aproveitamento da água, os mecanismos de ventilação, o tipo de iluminação, são um conjunto de questões que irão influenciar o desempenho energético do edifício e contribuir para o maior ou menor conforto higrotérmico.

### 2.5.1. Pressupostos exteriores ao edifício

Diversos são os fatores que influenciam a temperatura no interior dos edifícios. Estes incluem, as condições climatéricas (temperatura exterior, velocidade do vento, radiação solar), a estrutura do edifício, as características do sistema construtivo e dos materiais utilizados (espessuras das paredes, dimensão dos vãos envidraçados, condutividade térmica e calor específico dos materiais), fontes de calor internas, número de renovações de ar e equipamentos auxiliares de aquecimento ou arrefecimento

Em muitas circunstâncias entende-se como utilização passiva da energia solar, o simples isolamento da envolvente ou a preocupação com os fenómenos de fenestração, como contributo para as necessidades energéticas de um edifício, deixando de lado um conjunto de medidas e fatores tão ou mais importantes, tais como a localização e orientação do edifício, o tipo de vegetação envolvente, a forma e a relação com os espaços exteriores, a criação de sistemas de sombreamento, que encarados como um todo e interagindo entre si, otimizam a utilização passiva da energia solar.

Em muitos países estas medidas encontram-se integradas na legislação arquitectónica e urbanística, cujo cumprimento é obrigatório para o licenciamento da construção.

Não existe ainda, em Portugal nenhum tipo de legislação que imponha a incorporação destes factores e medidas na arquitectura de um edifício, continuando assim a construir-se sem ter em conta os princípios de integração climático-solar. Já que não se construíram edifícios tendo em conta estas preocupações, tenta-se agora apostar na incorporação destas medidas na reabilitação de edifícios existentes.

### 2.5.1.1. Localização

A configuração da topografia de um local tem grande influência nas condições microclimáticas dessa região.

Para se conseguir que uma construção seja termicamente eficiente é necessário integrá-la no meio ambiente que a circunda, recorrendo-se previamente ao reconhecimento e estudo do terreno em que se implanta o edifício.

Em terrenos acidentados é aconselhável a localização de pendentes a sul, uma vez que esta orientação é a mais favorável em termos de quantidade de insolação ao longo do dia. Neste contexto existem outros fatores importantes para além da orientação, tal como a humidade, as sombras existentes e os ventos dominantes, que influenciam a quantidade de calor que um edifício perde, conforme está esquematizado na Figura 1 [30].

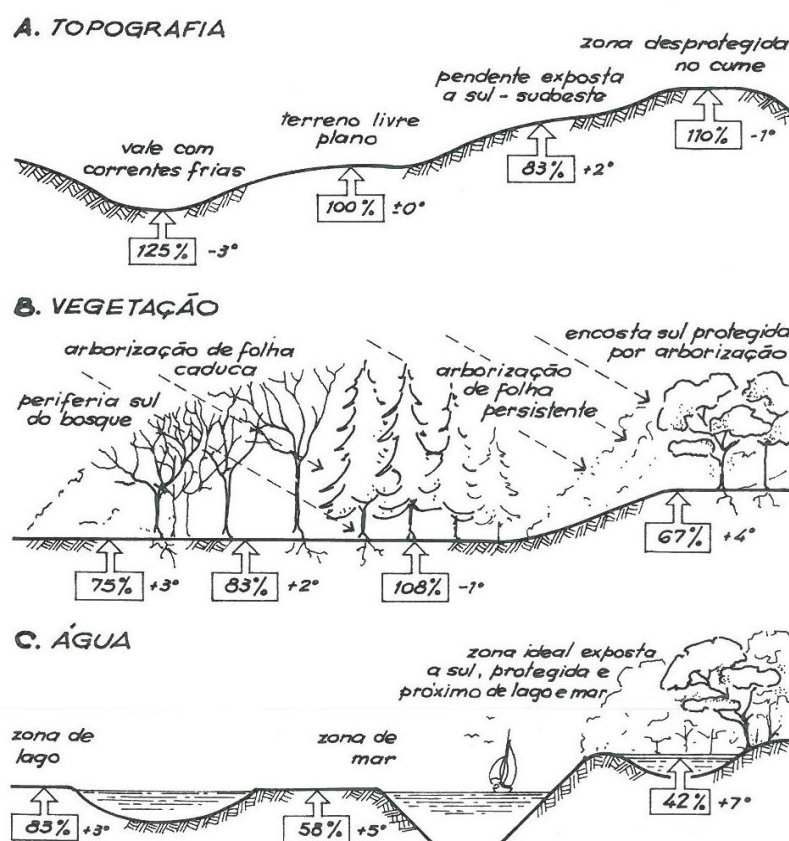


Figura 1: Quantidade de calor Q (em percentagem) que um edifício perde, em diversos posicionamentos, sob a influência dos fatores A,B ou C [30]

### 2.5.1.2. Forma

A forma do edifício é um fator preponderante nas perdas térmicas do mesmo, devendo ser a mais compacta possível, com poucas saliências e reentrâncias, pois quanto mais reduzidas são as perdas de calor, melhor será o seu balanço térmico global.

O coeficiente de forma do edifício (quociente da superfície exterior pelo volume habitável), permite ter uma ideia em relação às perdas térmicas, que são diretamente proporcionais à extensão da superfície exterior.

Cada edifício tem um coeficiente de forma diferente, sendo que para uma forma constante o volume exterior aumenta mais lentamente que o volume habitável, pelo que edifícios grandes têm menos perdas que um edifício pequeno. Como já foi referido na arquitetura do edifício deve-se sempre tentar colocar a maior face deste orientada a sul, em detrimento das restantes orientações, pois estas são menos favoráveis á exposição solar. Outro fator importante a ter em consideração que pode influenciar a forma do edifício, é o tipo de radiação solar a que este vai estar sujeito (radiação direta ou difusa) [30].

A intensidade do vento, a frequência e a direção dominante, tem grande influência no fenómeno de dispersão térmica, devendo ser tidos em conta na forma geral do edifício, de forma a obter-se um resultado aerodinâmico otimizado, Figura 2.

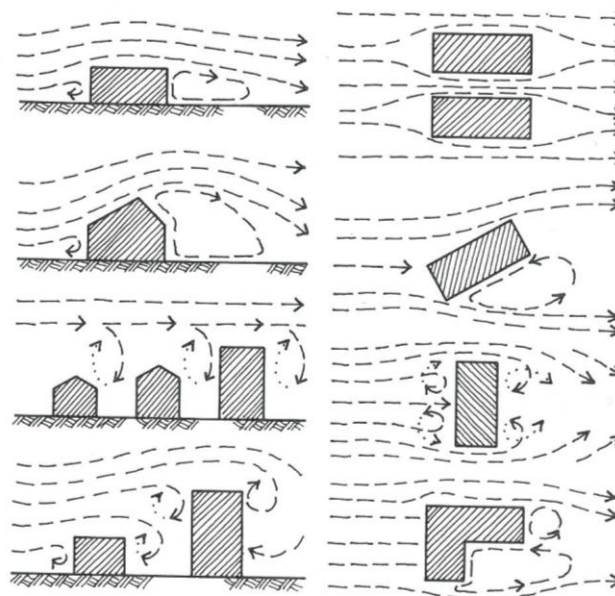


Figura 2: Efeitos aerodinâmicos provocados pelos ventos dominantes [30]

### 2.5.1.3. Orientação e afastamento

A conceção espacial do interior dos edifícios deve ser sempre realizada tendo em conta a hierarquização térmica dos espaços, de forma a obter as zonas tampão. Isto é, deve-se dar prioridade às zonas mais habitadas para que estas fiquem orientadas a sul, enquanto que arrecadações, escadas, corredores devem ficar situados a norte, devendo ainda esta fachada ter o mínimo de fenestração possível, ou quando possível ser protegida com elementos naturais tais como aterros ou taludes.

Para que no inverno os ganhos solares sejam otimizados de modo a garantirem as condições de conforto adequadas no interior do edifício, é necessário garantir que a fachada sul é abrangida pelo sol na sua totalidade. Neste contexto é indispensável ter em consideração a distância mínima entre edifícios, prevista na legislação, determinada em função da altura mínima do sol no inverno, de acordo com a Figura 3 [30].

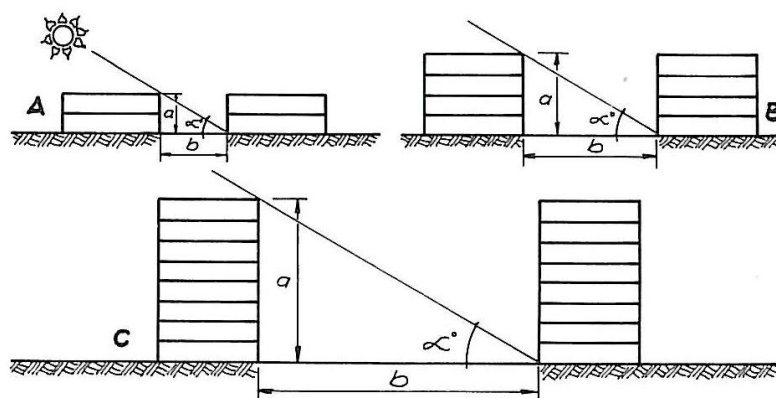


Figura 3: Esquema representativo da relação entre a altura solar e a cêrcea de construção [30]

A cêrcea de construção  $b$  deverá ser definida em função da altura solar de inverno,  $[b = (n \text{ pisos} \times 3 \text{ m}) / \tan \text{ altura solar de 21 de dezembro}]$ .

### 2.5.1.4. Vegetação

A vegetação pode ser um fator muito importante no auxílio da regularização das condições climáticas e integração dos edifícios no meio geográfico, considerando-se que a integração da vegetação só é viável em conjunto com sistemas de proteção contra o vento, para que seja possível a criação de microclimas amenos e em equilíbrio, como esquematizado na Figura 4.

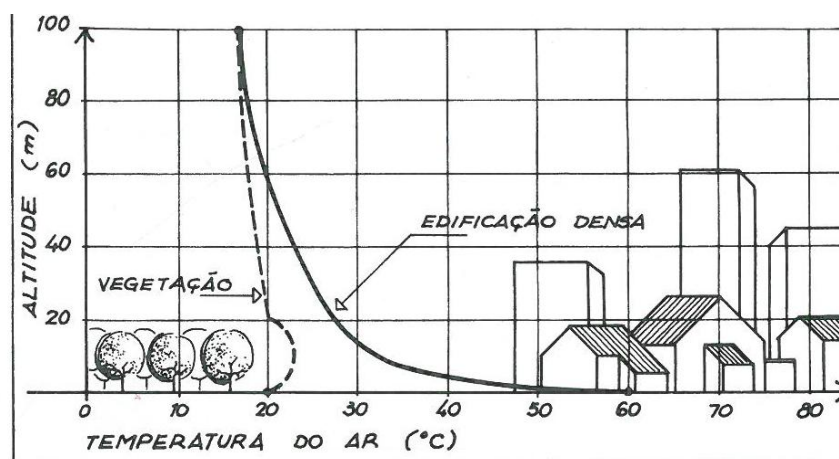


Figura 4: Comportamento da temperatura nas zonas verdes e zonas densamente edificadas [30]

As características e espécies de vegetação devem ser estudadas de modo a encontrar a que melhor se adequa a cada região, tendo em conta o tipo e densidade da folhagem, o posicionamento no terreno, o ordenamento entre si e o débito de evaporação.

Quando o edificado se encontra exposto a ventos dominantes, a vegetação mais adequada é a de folhagem persistente e muito densa, formando uma barreira protetora.

A vegetação não serve apenas como meio de proteção contra o vento, pode também ser utilizada como reguladora da quantidade de radiação solar nas fachadas. Isto é, são benéficos os ganhos solares durante o inverno através de fachadas envidraçadas ou em sistemas de ganhos indiretos (paredes de trombe), mas no verão se não forem devidamente previstos sistemas de proteção de modo a impedir o sobreaquecimento podem causar desconforto. A vegetação de folha caduca pode ser assim encarada como um bom sistema de proteção, uma vez que no inverno, não tem folhagem, permite os ganhos, e no verão a sua folhagem impede os ganhos indesejáveis, sendo um sistema natural, sem custos nem desvantagens e esteticamente agradável.

Outra forma de vegetação muito eficaz, são as chamadas trepadeiras, uma vez que estas plantas quando têm uma folhagem muito espessa, criam uma camada de ar imóvel entre a ramagem e a parede, melhorando substancialmente a condutância térmica superficial exterior. Uma camada de ar imóvel de 5 cm de espessura criada por esta vegetação na fachada exterior equivale a um valor de  $U$  de  $2,9 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{K}$ , correspondente ao efeito de uma janela de vidro duplo [30].

## 2.5.2. Pressupostos constituintes do edifício

Os pressupostos materiais e formais constituintes do edifício, com o objetivo de otimização do aproveitamento solar passivo, referem-se principalmente aos materiais utilizados na construção e à configuração adaptada para o edifício.

Os materiais e a forma do edifício encontram-se assim relacionados como fatores preponderantes para o respetivo balanço térmicos.

### 2.5.2.1. Envolvente

A envolvente do edifício pode ser entendida como o conjunto de toda a estrutura, paredes, pavimentos e coberturas, ou seja os elementos físicos que delimitam o interior do edifício do exterior. O tratamento da envolvente é de elevada importância na matéria da eficiência energética, pois através da aplicação de isolamentos térmicos adequados nestes elementos é possível obter consideráveis reduções nos consumos de energia para aquecimento.

A eficácia de um material para isolamento térmico é caracterizada pelo respetivo valor de condutibilidade térmica. Segundo o RCCTE considera-se isolante térmico o material cujo coeficiente de condutibilidade térmica seja inferior a  $0,065 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ , ou cuja resistência térmica seja superior a  $0,30 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ [31].

Uma medida de elevada importância no âmbito do isolamento da envolvente, é a aplicação deste em todo o perímetro da construção, inclusive no perímetro em contacto com o solo.

As perdas térmicas para o solo também ocorrem embora de forma diferente das efetuadas para o meio ambiente, uma vez que no terreno as amplitudes térmicas são inferiores, tal como as perdas térmicas absolutas, sendo por outro lado mais constantes (de dia e de noite), ao contrário das perdas para o meio ambiente que ocorrem com maior incidência durante a noite.

Quando o solo é muito húmido, a respetiva condutibilidade térmica é maior, logo é vantajoso a aplicação de material isolante, nos elementos em contacto com o solo.

O isolamento das paredes exteriores é importante na medida em que possibilita a manutenção das temperaturas a níveis adequados, impedindo, se colocado de forma a corrigir as pontes térmicas planas e lineares, a ocorrência de condensações.



As coberturas são elementos prioritários em relação à colocação de isolamento, uma vez que estes elementos estão sujeitos às maiores amplitudes térmicas, pois durante o dia encontram-se diretamente expostas à radiação solar, atingindo elevadas temperaturas, enquanto que à noite é o elemento que mais calor perde por radiação. O correto isolamento das coberturas é assim uma medida prioritária, uma vez que o mau isolamento pode originar temperaturas interiores muito desconfortáveis tanto no verão como no inverno.

#### **2.5.2.2. Fenestração**

A par da massa térmica constituinte da estrutura do edifício, os vãos envidraçados são os principais responsáveis pelo conforto, ou desconforto, no interior dos edifícios, pois deles depende quer o controlo dos ganhos solares quer a iluminação natural dos espaços interiores. Numa altura em que cada vez mais se projeta para obter um efeito estético com, recurso a estruturas leves, sem grande inércia térmica e com enormes vãos envidraçados, a evolução tecnológica destes elementos é crucial.

Quando a radiação solar incide sobre um vidro, uma parte é refletida, outra é absorvida através da espessura do vidro e uma terceira é transmitida. A relação entre cada uma destas 3 partes e o fluxo incidente definem os fatores de reflexão, absorção e transmissão do vidro. Para uma dada radiação incidente, estas relações dependem da cor do vidro, da sua espessura e, no caso do vidro com capa, da natureza desta última.

O fator de transmissão, reflexão e absorção energética é a relação entre o fluxo energético transmitido, refletido ou absorvido e o fluxo energético incidente. O fator solar, dum vidro é a relação entre a energia total (por transmissão e por absorção) que passa através desse vidro e a energia solar incidente.

Diversos estudos revelam que uma má conceção dos vãos envidraçados, conjugada com uma má construção, pode originar perdas energéticas da ordem dos 35% das necessidades térmicas do edifício, tornando-se de extrema urgência encontrar soluções para a sua correção.

As perdas térmicas mais significativas pela fenestração resultam da incorreta calafetagem das trinchas, permitindo infiltração excessiva de ar frio, e pela transmissão térmica direta, que pode ser evitada ou corrigida através da aplicação de vidros duplos ou

triplos, ou ainda a incorporação de persianas exteriores ou isolamentos interiores suplementares, como reposteiros ou cortinas.

Para além da correta orientação solar (Figura 5) e da devida proteção dos ventos dominantes, também se deve ter em conta a forma e o tipo de janela (fixa, de correr, basculante), que pode influenciar no seu comportamento térmico. Cada tipo de janela tem propriedades associadas que originam balanços térmicos completamente diferentes quando comparados com outras janelas de outras características [30].

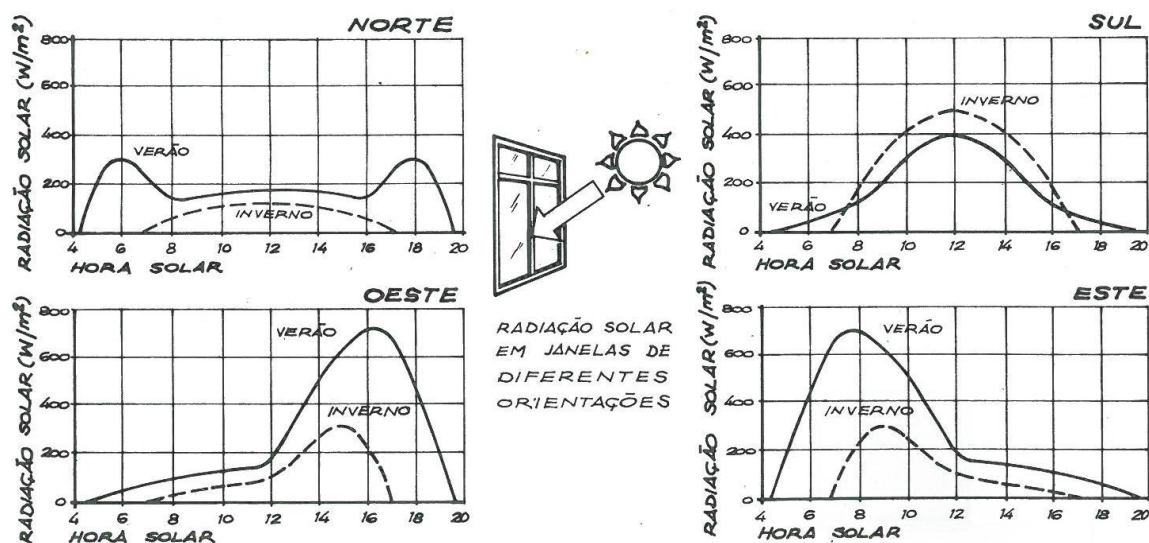


Figura 5: Representação esquemática da variação da radiação solar em janelas de diferentes orientações [30]

### 2.5.2.3. Sombreamento

Os sombreamentos são elementos indispensáveis quando se tem um edifício com grandes áreas envidraçadas, sendo, na estação de arrefecimento, necessário controlar a intensidade luminosa e a penetração de radiação solar excessiva.

Existem diversos tipos de sombreamentos, podendo ser exteriores ou interiores, fixos ou móveis, dependendo a sua eficácia do tipo e, do dimensionamento.

Os sombreadores exteriores são mais aconselháveis, dado que os interiores podem contribuir para um aquecimento suplementar, por efeito de convecção, tendo os sombreadores fixos exteriores a desvantagem de, mesmo quando devidamente dimensionados de modo a permitir a radiação solar direta na estação fria, poderem constituir um obstáculo para a radiação difusa, também benéfica nesta estação. Desta forma tornam-se os sombreadores móveis como toldos, palas de recolher entre outros, os mais recomendáveis, sendo ainda de fácil e prática aplicação em qualquer edifício[30].

#### **2.5.2.4. Ventilação**

O conforto fisiológico dentro de um edifício depende de diversos fatores, muitos deles dependentes do grau de ventilação, da temperatura do ar, da humidade relativa, da temperatura das paredes circundantes e da velocidade do ar, que devidamente combinados podem transmitir sensações de bem-estar.

As técnicas e estratégias de ventilação natural são um princípio básico da arquitetura bioclimática, dependendo das opções do arquiteto, podendo constituir um aspeto essencial quer do ponto de vista económico quer do ponto de vista da eficiência da solução adotada, para se atingir boa qualidade do ar interior e adequados níveis de conforto. Assim um projeto solar passivo deve ter em conta a geometria, o dimensionamento e o tipo de aberturas de fenestração de cada compartimento, considerando o edifício como um todo, de modo a permitir não só a ventilação de cada compartimento por si só, mas também a ventilação cruzada de modo a ventilar eficientemente todo o edifício [29].

É através da consideração e análise de todos estes fatores que se devem escolher e dimensionar soluções passivas de aquecimento e arrefecimento que tirem o máximo partido das potencialidades da envolvente.

É neste seguimento que os dois capítulos seguintes apresentam e caracterizam sistemas solares passivos de aquecimento e arrefecimento.



## Capítulo3

---

### Sistemas Solares Passivos



---

### 3. SISTEMAS SOLARES PASSIVOS

Os sistemas solares passivos de aquecimento são dispositivos construtivos integrados nos edifícios com a finalidade de proporcionarem o aquecimento natural da habitação. Com estes sistemas pretende-se maximizar o aproveitamento da radiação solar direta sobre vãos envidraçados, bem orientados e corretamente dimensionados, tendo em conta o tipo de atividade a desenvolver em cada divisão do edifício, potenciando assim os ganhos térmicos para o aquecimento do interior. Podem ainda ser associados elementos massivos propícios ao armazenamento da energia solar captada, que é libertada posteriormente permitindo que o edifício se encontre sempre com temperaturas amenas, mesmo no período noturno em que já não existem ganhos.

Um sistema solar passivo de aquecimento é aquele em que as três funções, de recolha, armazenamento e distribuição de energia solar, são realizadas por meios naturais, sem necessidade de recorrer a meios mecânicos e consequente consumo de energia [2, 32, 33]. Estes sistemas podem classificar-se em sistemas de ganhos diretos, indiretos, desfasados ou isolados [29, 32].

Nestes sistemas passivos, vários elementos do edifício, tais como paredes, telhado, janelas, envolvente exterior vertical são selecionados e arquitetonicamente integrados de modo a participarem na recolha, armazenamento, transporte e distribuição de energia térmica.

Os materiais de construção, como o tijolo, betão, pedra, materiais de mudança de fase (PCMs), água, colocados na envolvente do edifício, armazenam energia que libertam desfasadamente relativamente ao período em que a mesma é absorvida, contribuindo desta forma para a diminuição da amplitude da onda de calor: durante o dia o excesso de calor é armazenado nestes materiais, sendo libertado durante a noite [33].

#### 3.1. Ganhos diretos

Os sistemas de ganho direto são a solução mais adotada na maioria dos edifícios. Este facto decorre da sua simplicidade conceptual, uma vez que o sistema eficiente se consegue alcançar pela boa conceção do edifício, sendo aconselhável para zonas climáticas com invernos suaves ou moderados [32].

Os ganhos diretos são consequência da radiação solar incidente, a qual vai depender de vários fatores como a radiação diretamente emitida pelo sol, a radiação refletida (pelas nuvens) e a radiação difusa (parte da radiação solar refletida e difundida pela humidade da atmosfera). Assim, a radiação global é a quantidade de energia radiante admitida num intervalo de tempo por unidade de área de uma superfície horizontal (Wh/m<sup>2</sup>)[2, 34, 35] .

A energia térmica captada pode ser diretamente utilizada no aquecimento dos espaços interiores ou pode ficar armazenada na massa térmica do edifício para ser utilizada mais tarde. O calor absorvido propaga-se depois para o espaço interior a aquecer, através dos fenómenos de condução, por convecção natural e por radiação[32], como esquematizado na Figura 6.

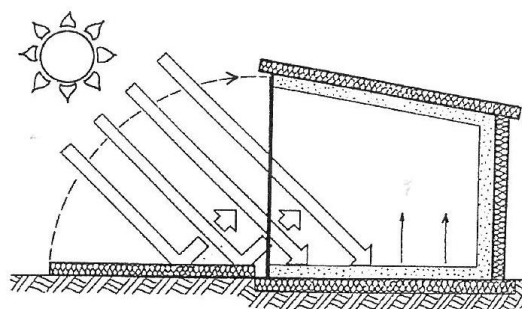


Figura 6: Representação esquemática de um sistema de ganho direto [32]

Para se otimizar esta captação devem ser colocados elementos com elevados coeficientes de reflexão junto aos vãos envidraçados, uma vez que é através destes que se realizam os maiores ganhos. No entanto, para que o sistema seja coerente não basta localizar o vão envidraçado na direção sul para entrada de radiação na estação fria. É também imprescindível a existência de uma inércia térmica no interior da envolvente isolada que permita reduzir possíveis trocas de calor com o exterior, bem como um isolamento noturno eficiente de modo a reduzir as perdas térmicas durante a noite, sombreadores de uso sazonal e mecanismos de ventilação natural [2, 32, 36].

Os elementos de construção devem ser realizados com materiais compactos, como betão e alvenaria maciça, e preferencialmente de cor escura, de modo a aumentar a sua eficiência, isto é, serem dotados de uma elevada capacidade de armazenamento de calor (elementos de massa elevada) e terem um elevado poder de absorção da radiação solar durante o dia e libertação da mesma no período noturno [2, 32]. Quando são usados



pavimentos e paredes como elementos de armazenamento, as paredes devem ser de cor clara caso o pavimento seja escuro[32].

Nos sistemas de ganho direto, as paredes e pavimentos de armazenamento expostos ao exterior, devem ser isolados pela face exterior [32]. A utilização de material de revestimento no interior com características isolantes implicaria que toda a radiação captada seria transmitida, não ocorrendo o armazenamento da energia excedente [2, 32]. O comportamento do vidro também é importante uma vez que este tem que ser transparente às radiações solares (pequeno comprimento de onda), mas opaco às radiações provenientes do interior das frações (grande comprimento de onda), para que não existam perdas do interior para o exterior através deste elemento construtivo [2].

Existem três tipos de coletores de ganhos solares diretos: as janelas, os clerestórios e as claraboias. As recomendações que se aplicam aos três coletores são a correta orientação da parede coletora para sul (variações até 20° este ou oeste), a área do coletor que está relacionada com a superfície do pavimento a aquecer, o tipo de vidro incorporado (vidro duplo) e a operacionalidade, isto é os coletores devem ser dimensionados a pensar na necessidade de ventilação natural [32]. Os clerestórios são indicados para situações em que os obstáculos locais, como árvores e edificações vizinhas, impeçam a captação da radiação solar pelas janelas. As claraboias são os coletores solares menos eficazes, devido ao seu posicionamento horizontal, uma vez que durante o inverno (o sol está baixo) recebem menor radiação solar e durante o verão, quando seria necessário menor captação de energia, é quando esta é máxima.

Para que este sistema passivo de aquecimento não provoque demasiado desconforto (pelas perdas no inverno e sobreaquecimento no verão) decorrente das variações de temperatura verificadas no interior dos edifícios, devem ser equacionados diversos controlos para adicionar eficiência aos sistemas de ganho direto [32].

### **3.2. Ganhos indiretos**

Uma sistema de ganho solar indireto, como esquematizado na Figura 7, é constituído por uma massa térmica de armazenamento interposta entre o vidro que recebe a radiação e o espaço interior que se pretende aquecer, formando assim uma parede coletora. A captação de energia é feita através da absorção de radiação solar pela massa

térmica, que a armazena e a transfere para o espaço interior, podendo esta transferência ser imediata ou desfasada [2, 34, 37].

Nestes sistemas existe um desfasamento da onda de calor transmitida para o espaço e o ciclo da radiação solar, devendo-se tirar partido deste desfasamento para se manterem os espaços aquecidos quando se pretende, consoante a sua utilização seja feita ao início da tarde, ao final ou só à noite. Esta gestão da transferência de energia é controlada pelo utilizador através da utilização de sistemas simples de ventilação [29].

Quando termina a incidência da radiação solar começam a ocorrer perdas de calor da parede para o exterior, daí haver a necessidade da existência de isolamento móvel pelo exterior, para impedir estas perdas noturnas. Tal como referido anteriormente, na estação de maior arrefecimento também devem ser previstos controlos para evitar o sobreaquecimento e o desconforto dos ocupantes [2].

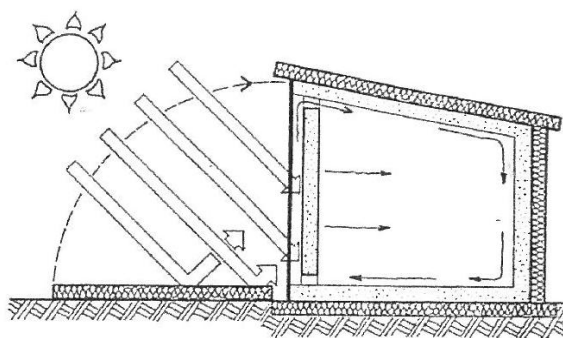


Figura 7: Representação esquemática de um sistema de ganho indireto [32]

### 3.2.1. Paredes de trombe

A parede de trombe é um sistema passivo de captação de energia solar de forma indireta, utilizada para aquecimento interno dos edifícios por transferência de calor, através de condução, convecção ou radiação.

A parede encontra-se interposta entre o vidro e o espaço interior a ser aquecido. Entre a parede e o vidro existe uma caixa-de-ar onde ocorre o fenómeno do efeito estufa, o que acaba por maximizar a absorção de calor pela parede, Figura 8. Este sistema de ar intermédio é responsável pelo ambiente ameno no espaço interior, uma vez que suporta as grandes amplitudes térmicas existentes entre o exterior e o interior[2, 34, 37].



Figura 8: Casa Schäffer, Porto Santo (Com Paredes de Trombe) Arq<sup>o</sup>. Günther Ludewig [29]

A espessura da parede deve variar entre os 10 e os 30 cm e a superfície exterior da mesma deve ser pintada com cor escura, aumentando assim a captação da radiação incidente [29]. A energia incidente pode ser instantaneamente transferida para o interior por meio da ventilação natural, através de orifícios na parte superior e inferior da parede, que geram termocirculação: o ar aquecido penetra pelas aberturas no topo da parede e é renovado por ar mais frio que entra nos orifícios inferiores [2, 29, 37, 38].

Caso não se pretenda o aquecimento imediato do interior, opta-se por não se introduzir a ventilação natural e utilizar a parede como um elemento de armazenamento, em que a energia incidente é acumulada e é transferida para o interior do espaço por convecção, demorando algum tempo, dependendo da espessura da parede, conforme representado na Figura 9. Esta estratégia permite que a energia esteja disponível há noite, quando é necessário maior aquecimento do espaço. Neste caso, o nome de parede de armazenamento é o mais adequado.

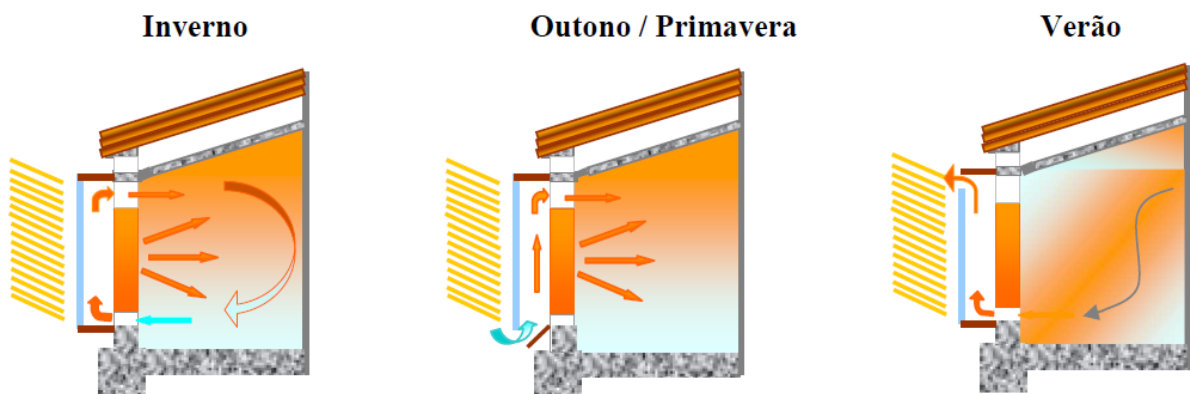


Figura 9: Esquema de funcionamento de uma parede de trombe [39]

Outra variante deste sistema pode ser utilizada para pré-aquecimento do ar exterior na primavera ou no outono, introduzindo um orifício entre o exterior e o espaço de estufa [29].

Existem em Portugal vários exemplos de habitações com aplicação deste sistema, tais como: a casa Shaffer (em Porto Santo), as casas de Jade (em Sintra) e a casa termicamente otimizada (no Porto) [29].

### 3.2.1.1. Dimensionamento de uma parede de trombe

A parede de trombe é uma boa técnica solar passiva a implementar na realização de uma reabilitação térmica de um edifício, pois é facilmente incorporada. Isto é, podem utilizar-se diretamente as paredes originais como acumuladores de calor, pintando-as de preto. Por fora coloca-se uma superfície de vidro deixando entre este e a parede uma câmara-de-ar, como ilustrado na Figura 10.

A parede deve ter características de modo a que o desfasamento ronde a ordem das 6 a 8 horas, de modo a aproveitar o máximo de aquecimento da face interior da parede no período noturno.

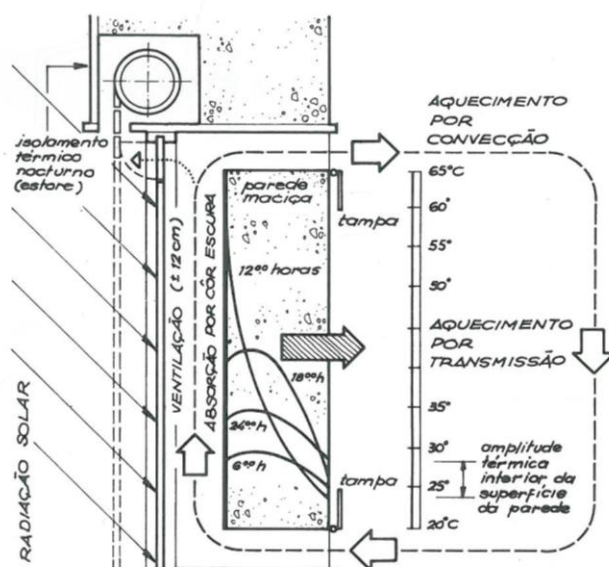


Figura 10 : Representação esquemática do funcionamento de uma parede de trombe e a evolução das suas linhas de temperatura [30]

A quantidade de calor acumulada pela estrutura do edifício e pela parede de trombe depende do calor específico dos materiais utilizados, da espessura da parede e de outros fatores importantes que influenciam o balanço térmico e devem ser considerados no dimensionamento de uma parede de trombe, tais como:

- Condições climatéricas (latitude, temperatura, vento);
- Orientação das aberturas;
- Características da envolvente térmica do edifício;
- Temperatura interior pretendida;
- Volume dos espaços a aquecer;
- Especificações do sistema de aquecimento.

### **Fatores externos**

#### *Clima*

O dimensionamento da parede de trombe é influenciado pela diferença de temperaturas exteriores e interiores, uma vez que quanto maior for a diferença de temperatura, maiores serão as perdas. A quantidade de calor perdida pela parede depende da diferença de temperaturas, pelo que em climas frios a parede deve ser sobredimensionada.

#### *Latitude*

Para locais situados a latitudes acima do equador, a energia solar no inverno incide sobre as fachadas orientadas a sul. Em latitudes abaixo do equador a energia solar incide sobre fachadas orientadas a norte.

#### *Orientação da parede de trombe*

A parede de trombe no hemisfério norte deve estar localizada a 5° do sul. Se for colocada a 15° do sul no verão reduzem-se os problemas de sobreaquecimento. A partir de 30° de desvio do sul deixa de ser eficaz.

Na Tabela 1 apresentam-se os critérios que auxiliam no dimensionamento das paredes de trombe, em função das condições climatéricas de inverno e das superfícies úteis a aquecer [40].

Em cada margem de valores deve-se utilizar o coeficiente segundo o valor da latitude em que se encontra o edifício, ou seja, para latitudes baixas (35° de norte) deve-se utilizar o menor valor, ao passo que para latitudes altas (48° de norte) opta-se pelo maior valor da margem.

Tabela 1: Critérios para o dimensionamento de uma parede de trombe em função das condições climáticas de inverno e a superfície útil a aquecer [40]

Temperatura média exterior de Inverno	Superfície de parede necessária por unidade de superfície útil a aquecer (m <sup>2</sup> )	
	Parede Maciça	Parede de água
<b>Climas Frios</b>		
- 10°C	0,72 – 1,00	0,55 – 1,00
- 7°C	0,60 – 1,00	0,45 – 0,85
- 4°C	0,51 – 0,93	0,38 – 0,70
- 1°C	0,43 – 0,78	0,31 – 0,55
<b>Climas temperados</b>		
+2 °C	0,35 – 0,60	0,25 – 0,43
+ 5°C	0,28 – 0,46	0,20 – 0,34
+7 °C	0,22 – 0,35	0,16 – 0,25

### Fatores internos

As paredes de trombe podem ser construídas com diversos materiais. Cada um tem uma condutibilidade térmica respetiva, de onde se pode determinar a espessura ideal da parede consoante o material escolhido.

Quanto maior for a condutibilidade térmica do material constituinte da parede, maior tem que ser a espessura da mesma, uma vez que uma parede com elevada condutibilidade transfere o calor rapidamente, o que não é aconselhável. Pode-se controlar o intervalo de tempo entre a captação da radiação e a libertação de calor no interior do edifício através da escolha do material e da sua conjugação com a espessura da parede. O desempenho da parede aumenta com a condutibilidade térmica da mesma, pois quanto maior a condutibilidade, maior a quantidade de calor transferido[40].

Na Tabela 2 apresentam-se alguns materiais com os respetivos valores de condutibilidade e as espessuras recomendadas.

Tabela 2: Efeito da espessura da parede de trombe sobre a amplitude das oscilações da temperatura interior [40]

Material	Condutividade térmica (kcal/h,m°C)	Espessura recomendada (cm)	Oscilação aproximada da temperatura interior em função da espessura da parede			
			10,0 cm	20,0 cm	30,0 cm	40,0cm
<b>Adobe</b>	0,45	20,0 – 30,0	-	10,0°C	4,0°C	4,0°C
<b>Tijolo</b>	0,63	25,0 – 35,0	-	13,0°C	6,0°C	4,0°C
<b>Betão</b>	1,0	30,0 – 45,0	-	15,5°C	9,0°C	5,5°C
<b>Tijolo com</b>	3,3	40,0 – 60,0	-	19,5°C	13,0°C	9,5°C
<b>Água</b>	-	15,0 ou mais	17,0°C	10,0°C	7,0°C	6,0°C

Uma parede de trombe vertical permite aquecer por radiação e convecção natural um espaço com profundidade de valor aproximado do dobro da altura da parede.

### Outros fatores

#### Tipo e posicionamento das janelas do edifício

Para que estes dispositivos ajudem a manter a temperatura no interior do edifício, aconselha-se que a área de janelas localizadas no lado norte da casa, não ultrapasse 4% da área total da parede, de modo a evitar grandes perdas energéticas[40].

#### Envolvente térmica do edifício

É tão importante o correto dimensionamento da parede de trombe para ocorrer um eficiente armazenamento de energia, como o correto isolamento das restantes paredes da envolvente, para que não ocorram perdas por estas.

#### Cor da superfície da parede de trombe

Quanto maior for a absorção de energia na face externa da parede, maior será a transferência de calor para o interior do edifício. Deste modo, devem ser utilizadas cores escuras, com elevadas percentagens de absorção, como a cor preta (absorção de 95%) ou azul escuro (absorção de 85%). Pode-se constatar pela Figura 11, o quão importante é a escolha de uma cor adequada [40].

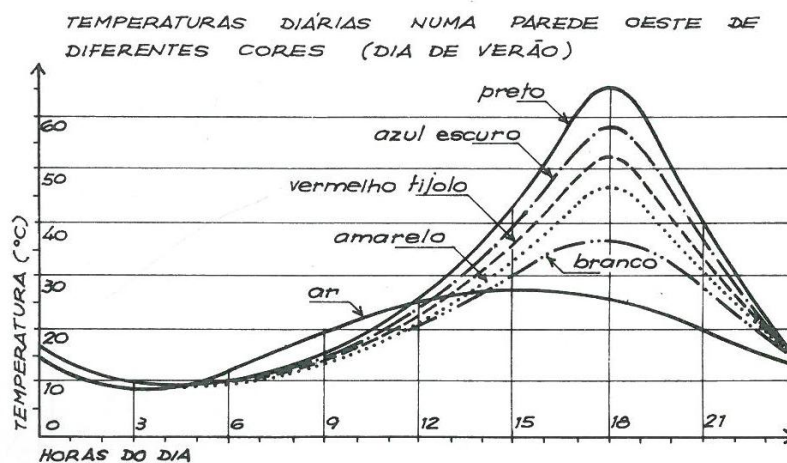


Figura 11: Representação esquemática da influência dos materiais e cores de uma fachada na evolução diária das suas temperaturas [30]

## Componentes

### Vidro

O papel do vidro na parede de trombe é gerar o efeito estufa, impedindo que a radiação volte para o exterior após ter sido captada.

A superfície do vidro adotado deve ter características que possibilitem um bom desempenho no inverno e não provocar sobreaquecimento no verão. Normalmente utilizam-se sistemas de sombreamento para obstruir a parede na estação quente, de modo a não ocorrer aquecimento excessivo. Geralmente o vidro é instalado na vertical, mas também pode ser girado de modo a obter a inclinação mais favorável à captação da maior quantidade de radiação. Em geral a área de vidro deve ser pelo menos 7% da área da casa e não deve exceder 12 % da mesma.

A utilização de vidros com elevados valores de transmitância maximiza o ganho solar da parede. Em contraste, a utilização de vidros duplos permite um melhor desempenho do sistema para valores inferiores de transmitância, mantendo-se uma maior quantidade de energia captada. No caso da utilização de vidros duplos, o vidro exterior deve possuir boas características uma vez que estará exposto ao tempo severo e à radiação ultravioleta. É conveniente, aquando do dimensionamento, desenvolver um sistema de limpeza do espaço interior entre a janela e a parede de armazenamento, especialmente se esta for ventilada. Existem ainda vidros fumados que limitam a visibilidade externa da parede de acumulação, sem afetar a transmissão de calor.

Embora o vidro seja o material mais aconselhável para a parede de trombe, existem várias condicionantes que devem ser consideradas, tais como os custos elevados e a fragilidade. Existem assim outros materiais que poderão substituir o vidro, como é o caso do plástico ou da fibra de vidro, geralmente de uso menos comum. O policarbonato, os fluorocarbonetos e o polivinílico são bons materiais do ponto de vista da resistência ao calor, que podem ser usados como substitutos do vidro interior. Por oposição, o polietileno e a fibra de vidro degradam-se muito mais rapidamente se utilizados no interior. A fibra de vidro é assim aconselhável para o uso exterior, tendo menores custos que o vidro[40].



### Orifícios exteriores de ventilação através do vidro

Em zonas temperadas, como é o caso de Aveiro, no verão o sobreaquecimento é um problema para a parede de trombe, devendo ser incluídas saídas de ar, caso não se utilizem sombreamentos móveis. No caso em que não tenham sido previstas aberturas na parede, devem ser incluídos orifícios de ventilação no vidro, tanto na parte superior, como na inferior. Caso tenham sido previstas aberturas na parede, basta efetuar aberturas na parte superior do vidro.

### Câmara de ar

Deve-se ter em atenção alguns fatores na decisão da distância entre a face interior do vidro e a face exterior da parede. Caso se opte por um espaço muito pequeno (inferior a 2 cm) as perdas de calor são muito grandes. Se a parede for ventilada a circulação de ar será limitada. Uma câmara-de-ar com espaço superior a 10 cm resulta num excesso de convecção térmica, reduzindo o armazenamento de calor. Se a câmara-de-ar tiver uma espessura superior a 1 m, torna-se num espaço habitável. Em geral, é aconselhável que o espaço de ar entre o vidro e a parede tenha uma espessura compreendida entre os 13 e os 15 cm [40].

### Parede acumuladora

Na construção desta parede deverão ser utilizados materiais com alta capacidade calorífica, elevada condutibilidade e transmissão térmica. É necessário prestar atenção à quantidade de calor que o material tem capacidade para armazenar e à rapidez com que o calor pode ser transmitido para o interior do espaço a aquecer.

Estas características estão diretamente relacionadas com quatro propriedades físicas dos materiais: a densidade, a condutividade, o calor específico e a capacidade térmica.

A quantidade de energia solar que pode ser armazenada, e mais tarde utilizada, numa parede de grande massa é limitada. Esta quantidade de energia não aumenta linearmente com a espessura da parede, isto é, a resistência térmica de uma parede está diretamente relacionada com a espessura, pelo que quanto maior a espessura, maior a resistência. Este efeito não é positivo, pelo que em dias enublados a quantidade de

energia retida no interior da parede flui para a parte exterior, reduzindo progressivamente o fluxo de calor para o interior do edifício. Deste facto advém a impossibilidade de armazenamento de calor útil, durante mais do que um dia de sol, em paredes espessas[40].

### Superfícies seletivas

A aplicação de uma superfície espectralmente seletiva pode aumentar o rendimento da parede. O uso de uma superfície seletiva pode aumentar a eficiência de uma parede em aproximadamente 30%.

A superfície seletiva é em geral composta por uma folha de cobre (material com alta condutividade térmica) fixa à parede. Tem uma camada de cromo (baixa emissividade na gama de ondas visíveis) e uma camada de óxido de cobre (que garante uma tonalidade escura e uma alta absorção de ondas visíveis). A superfície seletiva deve ser cuidadosamente fixa à parede de modo a alcançar 100% de adesão, não penalizando a absorção de calor pela parede [40].

#### **3.2.1.2. Eficácia**

Esta técnica solar passiva tem diversas vantagens tais como o baixo custo, e a facilidade de construção. É uma técnica de fácil incorporação na construção, tanto como parede estrutural, como parede construída à posteriori, pois não necessita de grandes obras sendo possível utilizar uma das paredes existentes.

Há ainda que referir outros aspetos importantes e positivos: a sua autossuficiência (não necessita de combustível, permitindo reduzir a fatura de aquecimento em grande percentagem), não contamina o ambiente, proporciona conforto térmico e irradia no infravermelho, que é mais penetrante e agradável do que os sistemas tradicionais de aquecimento de ar forçado, permitindo ainda alcançar temperaturas interiores mais estáveis que a maioria dos sistemas passivos.

### 3.2.2. Paredes de água

Este sistema é em tudo semelhante às paredes de armazenamento, com exceção do material de armazenamento que neste caso é a água (em contentores ou tonéis) em vez de um material compacto [2, 29].

O comportamento das paredes de água é bastante idêntico ao das paredes referidas anteriormente, com a diferença de que nestas últimas a transmissão de calor no material de armazenamento se dá por convecção interna e não por condução, existindo assim um menor desfasamento [35, 37, 41, 42].

Uma vez que a água é uma substância mais condutora do que um material compacto, neste sistema registam-se maiores perdas térmicas, sendo indispensável a aplicação de isolamentos noturnos. Estas paredes de água, comparativamente com as paredes de material construtivo, têm a vantagem de necessitarem apenas de um terço do volume e um quinto da espessura para possuírem as mesmas capacidades de armazenamento, permitindo assim a sua utilização em pisos superiores sem necessidade de alterações arquitetónicas ou estruturais [2].

Os depósitos não deverão estar completamente cheios, uma vez que a água tende a expandir-se com a variação da temperatura. Da mesma forma, é necessário que estes espaços sejam totalmente estanques para evitar a ocorrência de fugas [2].

Exemplos de edifícios com aplicação deste sistema são a Casa Solar (no Campus do INETI no Porto), em que a água foi colocada em colunas de fibra de vidro, pintada de cor escura [29], e a casa de Steve Baer (1971), em que se utilizaram tonéis metálicos, dispostos de tal forma que impedem a penetração da radiação solar na estação de arrefecimento [2].

O uso da água nestes sistemas não é exclusivo. Com efeito, podem ser utilizados outros líquidos, bem como diferentes tipos de reservatórios [29].

## 3.3. Sistemas de ganho isolado

Nos sistemas de ganho isolado a captação solar e o armazenamento dessa energia funcionam independentemente do edifício, isto é, não se encontram localizados nas áreas úteis [29, 32], Figura 12.

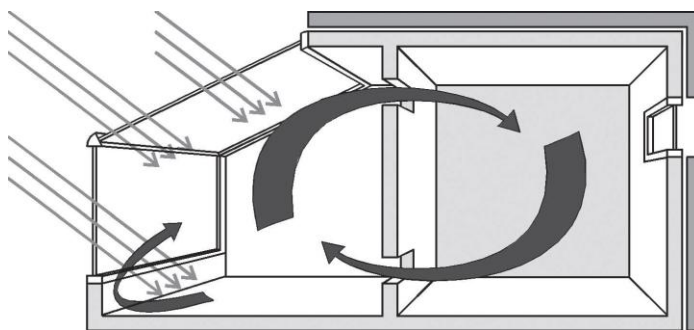


Figura 12: Representação esquemática de sistema de ganho isolado [29]

### 3.3.1. Estufas

Os espaços estufa são um exemplo de um sistema de ganho isolado, constituídos por uma envolvente fechada envidraçada que capta a energia solar incidente. Neste sistema existe a combinação de ganho direto (através das portas e janelas do edifício que proporcionam a termocirculação) com o ganho indireto uma vez que as paredes armazenam a radiação incidente, que mais tarde é transmitida ao espaço adjacente por condução através da parede, e ainda por convecção se existirem orifícios que propiciem a circulação de ar [2, 34, 37, 41, 43]. A energia captada pela estufa pode ainda ser armazenada em reservatórios de água ou paredes preenchidas com enrocamento por onde o ar circula e é aquecido [2].

Este sistema é um dos mais recorrentes em Portugal. Exemplos disso são um conjunto de moradias em Vale do Sobral e no Porto e ainda uma escola em Ferreira do Zêzere, Figura 13 [29].



Figura 13: Escola Ferreira do Zêzere com estufa [29]

### 3.3.2. Coletores de ar/termossifão/circuito de convecção

O sistema de termossifão é constituído por um coletor plano envidraçado, como dispositivo de captação solar, que permite que toda a radiação absorvida seja transmitida diretamente ao ar de insuflação (Figura 14) [2, 29, 32]. Neste sistema existem duas formas de ganhos, a direta (através da insuflação do ar aquecido por meio do coletor envidraçado para o interior do edifício) e a indireta (através do armazenamento térmico na massa de enrocamento que mais tarde liberta a energia térmica por convecção no espaço a aquecer) [2, 32, 35, 41, 44].

As diferenças de densidade do ar, entre a coluna aquecida e a não aquecida, propiciam o escoamento de ar quente, efetuando o movimento por convecção natural.



Figura 14: Vista exterior de um coletor de ar [29]

Quando este sistema não for suficiente por si só devem ser incorporadas ventoinhas adicionais ou aplicados sistemas de coletores solares evaporativos [32]. Este sistema tem uma dupla aplicação uma vez que, para além de servir para aquecimento no inverno, pode também ser utilizado no verão para extrair o ar quente do interior dos espaços. A aplicação deste sistema foi implementada na Escola do Crato [29].



## **Capítulo4**

---

### **Sistemas de Arrefecimento Passivo**





---

## 4. SISTEMAS DE ARREFECIMENTO PASSIVO

Os sistemas de arrefecimento passivo baseiam-se no desenvolvimento e adoção de estratégias que tiram partido das fontes frias existentes de modo a baixar as temperaturas interiores dos edifícios nas estações quentes, com o objetivo último de eliminar ou diminuir a necessidade de recorrer a sistemas mecânicos de arrefecimento.

A redução das necessidades de arrefecimento e a melhoria das condições de conforto térmico conseguem-se através da implementação de estratégias que diminuem os ganhos de calor e através do desenvolvimento de processos de dissipação de calor [29].

A orientação solar é um fator determinante para o desenvolvimento destas estratégias, principalmente assentes na ventilação natural e no controlo da radiação solar direta das superfícies envidraçadas, com recurso a elementos fixos como as palas ou a dispositivos móveis, como os estores. Existem ainda outros meios passivos de arrefecimento, designadamente o arrefecimento pelo solo, o arrefecimento evaporativo e o arrefecimento radiativo.

### 4.1. Ventilação natural

A ventilação natural ocorre quando se verificam diferenças de pressão atmosférica entre o interior e o exterior. Ou seja, o ar frio, ao ser mais pesado, tem tendência para baixar. Por sua vez, o ar quente, por ser mais leve, tem tendência para subir. Estas reações inversas acabam por provocar uma renovação natural do ar entre o interior e o exterior. Esta ventilação é necessária ao edifício para proporcionar o maior conforto térmico dos seus ocupantes, assim como para melhorar a qualidade do ar interior através da sua renovação [2, 35, 41, 43, 45, 46].

Esta técnica tem particular interesse de aplicação em Portugal, uma vez que o clima é caracterizado por grandes variações térmicas no verão (cerca de 20°C entre o dia e a noite), o que torna o sistema particularmente eficiente durante o período noturno [29].

#### **Ventilação interior**

Para que a ventilação natural no interior do edifício suceda eficazmente é necessário efetuar um correto posicionamento e dimensionamento das aberturas. Estas

aberturas podem ter várias configurações, sendo geralmente agrupadas em duas grandes categorias: a ventilação transversal e a ventilação unilateral [29].

A correta ventilação do edifício vai depender da combinação de três parâmetros: a dimensão da abertura (de modo a controlar a quantidade e a velocidade do ar que entra no espaço), a localização (que controla os desvios do fluxo) e o tipo de abertura (que permite controlar a direção do fluxo de ar frio) [2, 35, 38, 41, 45, 47].

Para se atingir uma maior capacidade de ventilação devem-se colocar as aberturas de entrada de ar nas zonas de alta pressão e as de saída nas zonas de baixa pressão, isto em faces opostas. Quando as aberturas estão implantadas em paredes adjacentes, pode-se aumentar a sua eficácia através da utilização de palas verticais, perpendiculares às paredes, condicionando o fluxo de ar pretendido. Pode-se ainda otimizar a situação de conforto com um fluxo de ar ascendente, conseguido através da localização das aberturas de entrada ligeiramente mais abaixo que as aberturas de saída [2, 46].

O sistema de chaminé, ilustrado na Figura 15, também constitui um bom sistema de circulação de ar na medida em que permite a entrada de ar frio pelos vãos, originando o arrefecimento do espaço interior. Simultaneamente, a chaminé vai permitir a extração do ar quente dos espaços ocupados pela abertura superior localizada a uma altura superior à da cobertura [29, 48, 49]. A casa *Shaffer* é um bom exemplo da aplicação deste sistema. Pode-se aumentar o desempenho do sistema através da utilização de um coletor na própria chaminé, que aumenta a temperatura do ar e facilita a sua saída [2, 35, 38, 41, 45].

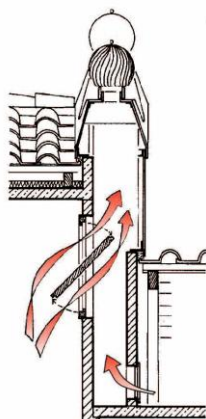


Figura 15: Pormenor de funcionamento de Chaminé Solar [1]

## **4.2. Sombreamento**

Como referido anteriormente, a proteção dos vãos envidraçados utilizados para a captação de energia solar é essencial para que não ocorra sobreaquecimento ao longo da estação quente e perdas térmicas nas estações frias, sobretudo nos períodos noturnos [2, 35, 36, 38, 45].

Os dispositivos de assombreamento podem integrar-se em três categorias: fixos, (como varandas, beirados ou palas), vegetais (plantas e árvores de folha caduca) e móveis (portadas, venezianas e outros elementos colocados pelo exterior) [2].

## **4.3. Arrefecimento pelo solo**

O aproveitamento da energia geotérmica para reduzir as necessidades de aquecimento e de arrefecimento em edifícios tem sido alvo de crescente interesse nos últimos anos [50].

O sistema de arrefecimento pelo solo pode ocorrer por dois processos: através de contacto direto ou indireto com o solo.

Ambos os métodos são eficientes na medida em que o solo apresenta temperaturas inferiores às do exterior, sendo uma fonte fria importante para dissipar o calor interno dos edifícios.

No processo de arrefecimento por contacto direto com o solo, o edifício encontra-se diretamente ligado ao solo através das paredes e pavimentos, registando-se perdas térmicas através destes elementos [29].

No arrefecimento por contacto indireto é utilizado um sistema enterrado de condutas de ventilação (Figura 16), em que o ar é captado através de uma abertura mantida num local adjacente ao edifício. No verão, o ar, ao atravessar o solo que se encontra a temperaturas inferiores, fica mais frio e ao ser introduzido no edifício promove o seu arrefecimento. No inverno dá-se o inverso [1, 29, 50].

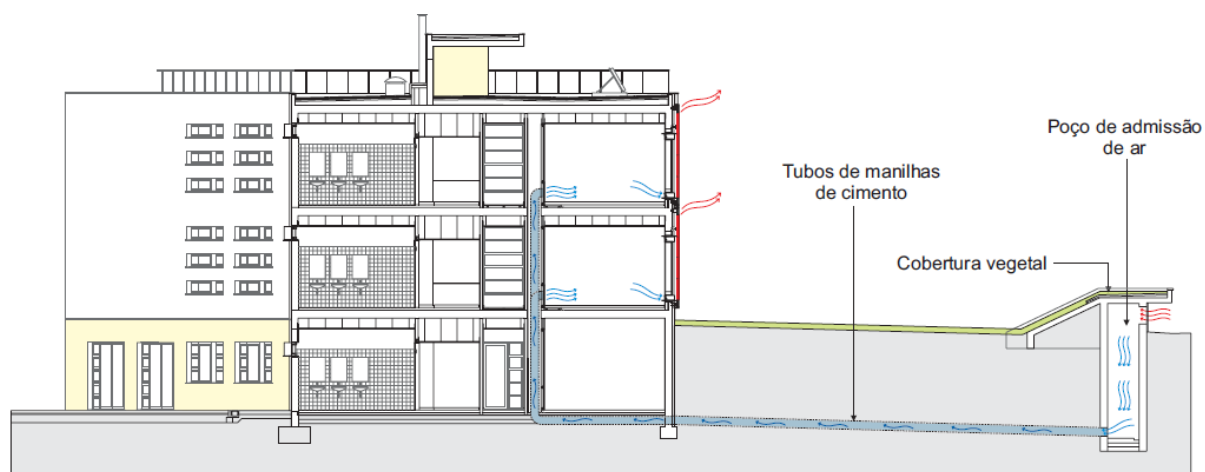


Figura 16: Sistema de arrefecimento do ar através de tubos enterrados [51]

#### 4.4. Arrefecimento evaporativo

A estratégia do arrefecimento evaporativo baseia-se na diminuição da temperatura devido à mudança da água do estado líquido para o estado gasoso. No arrefecimento evaporativo direto, o ar é arrefecido pela evaporação da água antes de entrar no edifício. Este método encontra-se assim dependente da existência de elementos que propiciem o arrefecimento: construção de fontes, lagos, piscinas artificiais e da proximidade de vegetação nas entradas do edifício [29].

Este processo funciona pela substituição de uma certa quantidade de calor sensível do ar, pela mesma quantidade de calor latente, na forma de vapor de água [2]. Isto é, o ar quente no exterior, ao passar pelo vapor de água libertado pelas fontes ou lagos, arrefece antes de entrar no edifício. É aconselhável a utilização de pátios onde se encontrem estes dispositivos, rodeados pelos espaços habitáveis do edifício, havendo assim um maior aproveitamento do ar arrefecido[29].

#### 4.5. Arrefecimento radiativo

Segundo Gonçalves e Graça [14], o arrefecimento radiativo é um sistema que se baseia no arrefecimento dos edifícios a partir da emissão de radiação dos elementos da envolvente do mesmo, ou seja as partes quentes libertam o calor para o espaço exterior. É um sistema que geralmente utiliza a cobertura do edifício como elemento radiativo,

uma vez que é este elemento que se encontra mais exposto favorecendo mais trocas radiativas.

De acordo com Ramos [1], a utilização de pátios internos contribui para o arrefecimento por radiação, podendo o seu desempenho ser maximizado com a utilização de coberturas inclinadas nas construções vizinhas.

Outra possibilidade deste sistema é a colocação de um reservatório de água na cobertura da habitação, o qual durante o dia absorve o calor do espaço interior e à noite liberta-o para o exterior. Nesta opção torna-se imprescindível o recurso ao isolamento para impedir os ganhos provenientes da radiação solar durante o dia, devendo retirar-se à noite para permitir a libertação do calor armazenado. O sistema funciona de modo inverso no inverno, permitindo a absorção da energia solar durante o dia e o aquecimento do espaço interior à noite [2, 35].

Outra opção à colocação do reservatório pode ser a instalação de uma piscina na cobertura, permitindo o arrefecimento do espaço interior por radiação e por evaporação.

Neste sistema é instalado um tubo que liga a piscina ao interior do edifício, por onde desce a água arrefecida, que quando atingir temperaturas inferiores às da piscina, propicia a ocorrência de termocirculação, levando ao arrefecimento [2].

Estes sistemas de arrefecimento radiativo não são muito frequentes em Portugal. Mesmo em termos internacionais, conhecem-se apenas alguns casos ainda em fase de estudo em edifícios experimentais dos EUA [29].

Descritos os sistemas solares passivos, apresenta-se de seguida a caracterização dos materiais mudança de fase (PCMs), que podem ser definidos de uma forma simplificada, como materiais com a capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperatura, absorvendo ou libertando energia do meio envolvente.

Constituindo assim também um a tecnologia passiva de conforto climático.



## Capítulo 5

---

Materiais Mudança de Fase





---

## 5. MATERIAIS MUDANÇA DE FASE

Pretende-se neste capítulo fazer uma introdução ao conceito de material de mudança de fase (Phase Change Materials). A sua classificação, propriedades mais relevantes, modo funcionamento e algumas aplicações serão apresentadas. Associada a esta informação será também caracterizado o seu suporte, nomeadamente o processo de microencapsulamento e materiais utilizados.

Atualmente há uma forte tendência para se aplicar nos edifícios elementos construtivos leves, para diminuir as respetivas dimensões e ganhar espaço útil. A construção tradicional, típica da arquitetura vernacular, caracteriza-se pela forte inércia térmica através da massa de paredes da envolvente e divisórias, ou seja, o edifício, com paredes espessas de terra, pedra ou de elementos cerâmicos, alcança estabilidade térmica e uma diminuição significativa relativamente à dependência energética. No entanto, estes sistemas funcionam utilizando a parte sensível do calor de aquecimento ou de arrefecimento, o que limita significativamente a sua capacidade de acumular energia, já que estes sistemas nunca podem atingir temperaturas abaixo da temperatura mínima do ar durante a noite, ou temperatura acima dos limites estabelecidos pela energia proveniente da radiação solar. É também necessário considerar-se o facto do aquecimento ou arrefecimento por condução de sólidos tender a concentrar a energia nas camadas mais superficiais. Outra das desvantagens inerentes aos sistemas de armazenamento de energia na forma de calor sensível é que tanto o carregamento como a descarga da energia são realizados em gamas de temperaturas variáveis, uma vez que é a essência fundamental de sistemas sensíveis de modo que nunca trabalham sob condições constantes de conforto [52].

Em alternativa a este sistema existe o processo baseado no uso do calor latente dos materiais quando estes mudam de estado físico. Esta capacidade é característica de todos os materiais, apesar de ser mais eficaz nos materiais genericamente denominados por materiais mudança de fase (PCM), Figura 17 [33, 52].

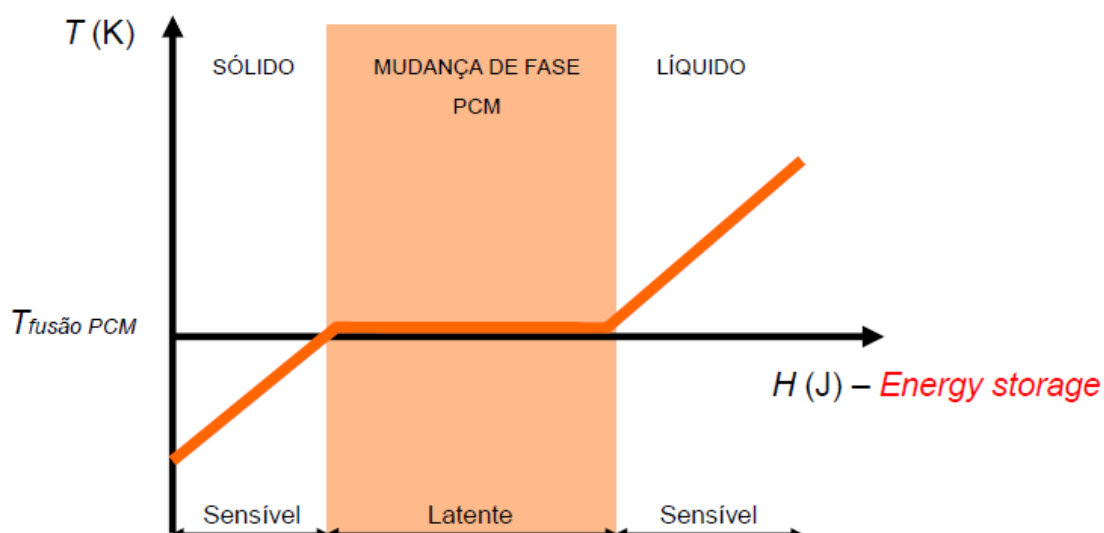


Figura 17: Comportamento dos materiais de mudança de fase em termos de calor específico e entalpia [53]

A energia latente acumulada durante a fase de transição não é senão a energia necessária para quebrar ligações moleculares, um processo que começa quando a temperatura proporciona a fusão do material, diferente de material para material. A capacidade de calor destas substâncias não é, portanto, constante na faixa de temperatura, assistindo-se a um aumento quando a temperatura se aproxima da fusão. Durante a fase de transição, o material permanece a uma temperatura bastante constante, perto da fusão, evitando, por exemplo durante o verão, o sobreaquecimento dos elementos em que é usado [54].

Os PCMs podem ser definidos como materiais dotados da capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperatura, armazenando calor latente quando mudam de uma fase sólida para a fase líquida (ocorrendo uma reação endotérmica), sendo posteriormente esse calor libertado quando estes materiais regressam à fase sólida (reação exotérmica). Durante este processo de mudança de fase, a temperatura do PCM mantém-se praticamente constante. Quando a mudança de fase está completa o aquecimento/arrefecimento contínuo resulta no aumento/diminuição da temperatura, de forma gradual e definida pelo calor sensível [4, 55, 56].

Estes sistemas permitem a construção leve fornecendo uma maior inércia térmica ao edifício que, combinado com o isolamento térmico, pode reduzir o seu consumo energético, absorvendo os ganhos de calor e reduzindo o fluxo de calor, permitindo a

redução das flutuações de temperatura; durante o dia o PCM pode absorver parte do calor através do processo de fusão, sendo durante a noite o calor libertado pela solidificação do PCM [57].

### 5.1. Classificação e propriedades dos PCMs

Os materiais mudança de fase podem ser classificados em diferentes subcategorias com base na sua composição química: orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas, de acordo com a Figura 18 e Tabela 3.

Os compostos orgânicos subdividem-se ainda em parafínicos e não parafínicos, enquanto que os compostos inorgânicos dividem-se em sais hidratados e metálicos. Uma mistura eutética é constituída por dois ou mais componentes que fundem e cristalizam congruentemente, formando uma mistura de cristais compostos [4, 58].

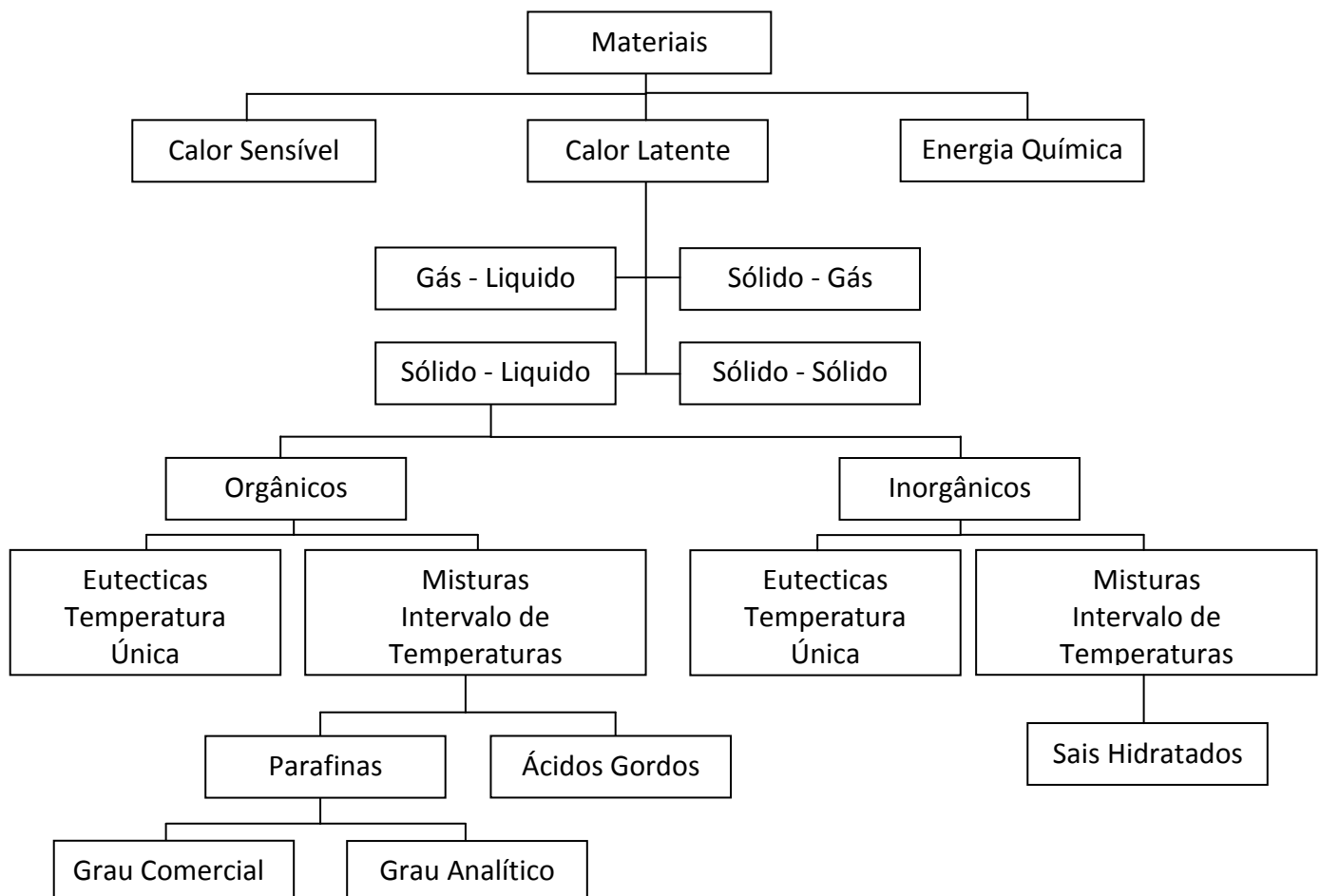


Figura 18: Classificação dos materiais de armazenamento de energia [59]

Tabela 3: Classificação e características de alguns PCMs [33, 60]

	PCMs	Temperatura de fusão ( °C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Inorgânicos	KF.4H <sub>2</sub> O (Fluoreto de potássio tetrahidratado)	18,5	231,0
	CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O (Cloreto de cálcio hexahidratado)	29,0	190,0
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O (Sulfato de sódio decahidratado)	32,0	251,0
	LiNO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O (Nitrato de lítio trihidratado)	30,0	296,0
	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O (Nitrato de zinco hexahidratado)	36,4	147,0
Orgânicos	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>26</sub> COO(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> (Estereato de butilo)	19,0	140,0
	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> OH (1-Dodecanol)	26,0	200,0
	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>32</sub> COOC <sub>3</sub> H <sub>7</sub> (Palmitato de propilo)	19,0	186,0
	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> OH (1-Tetradecanol)	38,0	205,0
Misturas Eutécticas	CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O / MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O (Cloreto de cálcio / Cloreto de magnésio)	25,0	127,0
	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O / Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O (Nitrato de cálcio / Nitrato de magnésio)	30,0	136,0
	Na(CH <sub>3</sub> COO).3H <sub>2</sub> O / CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (Acetato de sódio / Ureia)	30,0	200,0
	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH / CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH (Ácido cáprico-laurico)	21,0	143,0

Os PCMs devem possuir propriedades termodinâmicas, cinéticas e químicas específicas de modo a poderem ser utilizados como sistemas de armazenamento de energia. O preço e a disponibilidade do material são também fatores relevantes a considerar na escolha do tipo de PCM a utilizar.

Sob o ponto de vista termofísico é necessário assegurar que o PCM escolhido tenha as seguintes características: temperatura de transição de fase na margem de temperaturas de operação desejadas; elevado calor de transição por unidade de volume, de modo a armazenar o máximo de energia e o mínimo de incorporação possível de PCM; elevado calor sensível, representado pela sua capacidade calorífica, de modo a aumentar a sua capacidade de armazenamento de energia; elevada condutividade térmica no estado sólido e líquido, de forma a mais facilmente promover a transferência de calor; reduzida variação de volume durante a transição de fase, reduzindo os problemas com a

sua contenção e processo de fusão congruente de forma a manter constante a capacidade de armazenamento ao longo de ciclos repetidos [4, 33, 58, 60].

Do ponto de vista cinético, o PCM escolhido deve possuir uma elevada velocidade de cristalização, no sentido de evitar o subarrefecimento da fase líquida e responder às solicitações do meio envolvente.

Por último, sob o ponto de vista químico, o PCM deverá apresentar ciclos de carga/descarga totalmente reversíveis; não deverá degradar-se após um grande número de ciclos; deverá ser preferencialmente não-inflamável, não corrosivo, não tóxico e não explosivo.

As propriedades térmicas dos PCMs são geralmente avaliadas através da calorimetria diferencial de varrimento (DSC). Este método consiste na medição da energia absorvida/libertada durante o processo de aquecimento/arrefecimento de uma amostra do material a caracterizar, sendo assim possível a identificação das gamas de temperatura de transição bem como da energia associada à mesma [58, 61].

#### 5.1.1. PCMs orgânicos

Os PCMs orgânicos são compostos baseados em parafinas, longas cadeias lineares constituídas por carbono e hidrogénio, cuja temperatura de fusão varia em função do número de átomos de carbono que os constituem. As parafinas puras contêm geralmente entre 14 e 40 átomos de carbono, ao passo que as ceras parafínicas contêm geralmente entre 8 e 15 átomos de carbono. Consoante o número de átomos de carbono que cada parafina contém, assim varia o seu nome [61].

Estes compostos não são tóxicos nem corrosivos, tem um alto calor latente de fusão, são inflamáveis, têm baixa condutibilidade térmica e o seu comportamento térmico mantém-se estável durante um largo período de utilização[4, 58, 61].

Em comparação com outros PCMs, estas parafinas contêm elevadas capacidades de armazenamento térmico, absorvendo aproximadamente 200 kJ/kg de energia durante o seu processo de fusão. A temperatura de fusão destes compostos está diretamente relacionada com o tamanho da cadeia, aumentando à medida que aumenta o número de átomos de carbono, como se pode verificar na Tabela 3 [58, 61].

Através da mistura de diferentes parafinas é possível obter determinadas gamas de temperatura de transição. De entre os tipos de PCMs descritos na Tabela 4, os mais utilizados são o hexadecano, o octadecano e o eicosano, por serem economicamente mais viáveis [61].

Tabela 4: Temperaturas de mudança de fase e valores de capacidade de armazenamento térmico de alguns PCMs paraafínicos [61]

PCM	Nº de átomos de carbono	Temperatura de mudança de fase ( °C)	Entalpia de mudança de fase ( kJ/kg)
Hexadecano	16,0	18,5	237,0
Heptadecano	17,0	22,5	213,0
Octadecano	18,0	28,2	244,0
Nonadecano	19,0	32,1	222,0
Eicosano	20,0	36,1	247,0
Heneicosano	21,0	40,5	213,0

Quando comparados com outros PCMs, os orgânicos têm um custo inicial mais elevado. Apesar disso, tendem a ser os mais utilizados numa série de aplicações, porque são substâncias quimicamente mais estáveis por comparação aos PCMs inorgânicos.

No entanto, os PCMs orgânicos apresentam também algumas desvantagens, tais como a sua inflamabilidade e a produção de fumos perigosos durante o seu processo de combustão. Pode ainda ocorrer uma oxidação térmica ao longo do tempo e um aumento de volume apreciável. É possível eliminar alguns destes inconvenientes através de uma apropriada seleção e modificação dos materiais [61, 62].

### 5.1.2. PCMs inorgânicos

Estes compostos são constituídos por sais hidratados, incluindo o sal de Glauber (sulfato de sódio decahidratado), um dos materiais mais estudado no início das investigações sobre os PCMs. Comparativamente com os PCMs orgânicos, os PCMs inorgânicos apresentam elevadas entalpias de transição, como se pode verificar na Tabela 3, não são inflamáveis, são mais baratos e de fácil acessibilidade.

No entanto, apresentam algumas desvantagens. São mais suscetíveis à decomposição, são corrosivos e podem apresentar subarrefecimento, o que afeta as suas propriedades de transição. Além disso, a alta densidade de armazenamento dos sais hidratados é difícil de manter durante o ciclo, pois os sais hidratados ao derreterem

formam sais com valores de densidade de armazenamento mais baixos, o que torna o processo irreversível e, conseqüentemente, resulta numa menor capacidade de armazenamento [4, 58].

### 5.1.3. Misturas eutécticas

Em geral, estes materiais são consequência da combinação de dois ou mais compostos de natureza orgânica, inorgânica ou ambas, resultando assim um PCM com características melhoradas, uma vez que através da combinação de compostos, obtêm-se um material com temperaturas de transição mais aproximadas às necessidades do que os compostos que a originam, individualmente. O comportamento destas misturas é, em geral, semelhante ao de um sal hidratado. A principal desvantagem das misturas eutécticas é o seu custo. Atualmente é uma solução duas a três vezes mais dispendiosa do que as que se obtêm dos compostos individualizados. Anteriormente foram apresentados alguns exemplos destes compostos na Tabela 3 [4, 58, 61].

### 5.1.4. Encapsulamento dos PCMs

#### 5.1.4.1. Macroencapsulamento

O macroencapsulamento compreende a inclusão de PCMs em sistemas de contenção, tais como tubos, bolsas, esferas, painéis ou outros recipientes, ver Figura 19. Estes podem servir diretamente como permutadores de calor ou podem ser incorporados em produtos de construção de edifícios [63]. Desenvolveram-se alguns estudos e experiências sobre o macroencapsulamento com grande volume de contenção, a partir das quais se verificou que não se tratava de uma solução viável, devido à baixa condutividade térmica da maior parte dos PCMs. Com efeito, estas matérias tendem a solidificar-se nos bordos do encapsulamento e a impedir uma eficaz transferência de calor [64].

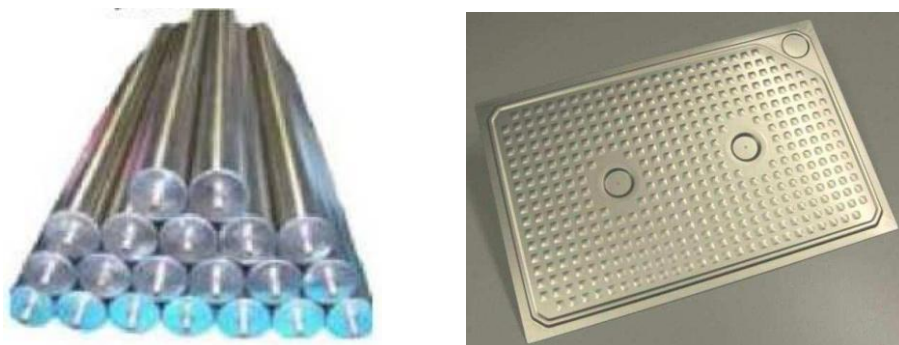


Figura 19: Macroencapsulamento de PCMs [63, 64]

#### 5.1.4.2. Microencapsulamento

O microencapsulamento é um método que se baseia no envolvimento de pequenas partículas ou gotas de um composto líquido ou sólido, denominado de núcleo, por uma camada ou parede de um material sólido, em geral, um polímero, denominada de cápsula [61].

Este método permite a incorporação de PCMs nos materiais de construção e a existência de um sistema de armazenamento portátil de calor.

Apresentam-se de seguida os principais métodos de microencapsulamento, que se dividem em processos químicos, físico-químicos ou mecânicos, como sinteticamente esquematizado na Figura 20.

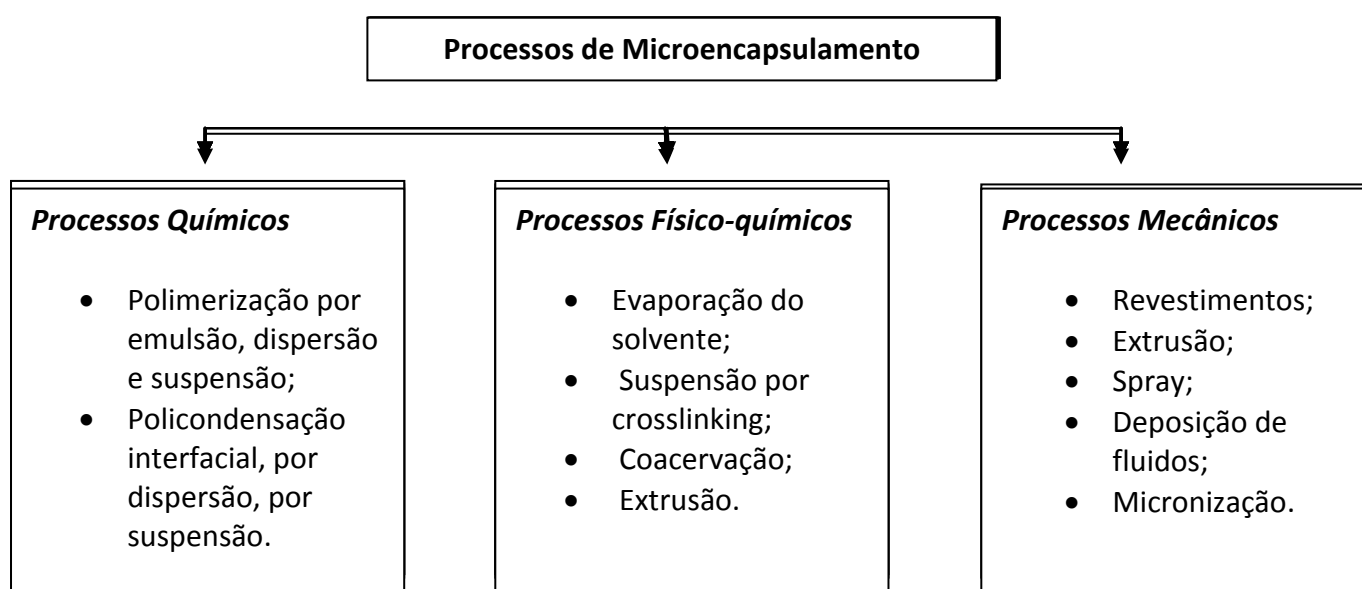


Figura 20: Processos de microencapsulamento [61, 65]



Este método de microencapsulamento é aplicado em distintas áreas, como nos fármacos, nas fragrâncias e nos produtos cosméticos, com o objetivo de proporcionar uma libertação controlada das substâncias. No caso específico dos PCMs pretende-se que este material se mantenha no interior da microcápsula em condições normais de manuseamento e que apenas interaja de forma indireta com o meio envolvente.

A escolha do processo de microencapsulamento e da própria substância para a formação da cápsula é de especial importância, uma vez que a estabilidade química, física e mecânica da subsequente aplicação dependem diretamente destes fatores, ver Figura 21 [61, 66].



Figura 21: Microencapsulamento com cápsula polímera [64]

As microcápsulas devem, sempre que possível, possuir um diâmetro reduzido para que se garanta um rápido intercâmbio de transferência de calor com o meio envolvente. Uma desvantagem que foi possível constatar após vários ensaios efetuados às microcápsulas de PCM de origem parafínica tem sido a deteção de múltiplos picos nas curvas de arrefecimento, indicadores de sobrearrefecimento, revelando-se um fator limitativo da sua aplicação. Este fenómeno conduz à redução das temperaturas de cristalização do PCM, originando a libertação da energia latente a temperaturas mais baixas (eventualmente fora da gama de operação desejada) ou a gamas de temperaturas mais largas [61, 67].

## 5.2. Aplicações com recurso de PCMs

São inúmeras as áreas de aplicação de PCMs, mas o uso destes materiais para o armazenamento térmico de energia em edifícios foi uma das primeiras aplicações estudadas. Estes sistemas de armazenamento de calor latente ganharam uma maior expressão face aos sistemas de armazenamento de energia sensível em aplicações cujas

amplitudes térmicas são inferiores, em virtude da sua elevada capacidade de armazenamento e do processo de armazenamento se dar de forma quase isotérmica.

De modo a conseguir ter-se uma real noção da magnitude da energia envolvida no fenómeno de transição de fase, compara-se a capacidade calorífica, calor latente, do betão, de valor 1 kJ/kg.°C, com o calor latente de fusão de um PCM, tomando como exemplo um sal cálcio, 193 kJ/kg.°C [61].

No sector da construção foram avaliadas inúmeras aplicações de materiais mudança de fase, todas elas destinadas a melhorar o conforto térmico e a reduzir o consumo energético dos sistemas mecânicos de aquecimento/arrefecimento no verão e inverno, através de uma maior massa térmica do edifício. Existem assim diversos exemplos de aplicação de PCMs em edifícios reais, inseridos em zonas com determinadas características climáticas, onde se constatou que a aplicação é bastante vantajosa, por comparação com os resultados obtidos com materiais tradicionais [33].

Para a aplicação destas matérias num projeto deve-se ter em atenção o tipo de efeito pretendido, bem como as características arquitetónicas do edifício. Em função destas particularidades é que se pode proceder a uma análise cuidadosa da natureza, da temperatura de transição, da percentagem, da forma de incorporação e da localização do PCM.

A otimização destes parâmetros é fundamental de forma a demonstrar as possibilidades de sucesso do uso de PCMs na construção. Como em tantas outras tecnologias, o sucesso de um produto depende mais da forma como este é corretamente aplicado do que da qualidade do produto em si mesmo.

Uma das aplicações mais conhecidas de PCMs em edifícios, passa pela impregnação destes em materiais de construção porosos, como o gesso ou o betão, a fim de modificar as suas propriedades térmicas. A aplicação de PCMs na estrutura dos edifícios é vantajosa, uma vez que estes oferecerem grandes áreas para o armazenamento e transferência de energia em todas as zonas. Além disso, a sua incorporação não acarreta custos adicionais, exceto o do material, pois a sua aplicação é efetuada de forma convencional.

Na Figura 22 são apresentadas, esquematicamente, algumas das diferentes funções projetadas para a utilização de PCMs na estrutura de edifícios. No âmbito deste trabalho

apenas se referem as soluções expostas na primeira linha, uma vez que as restantes são soluções de combinação de sistemas passivos com ativos.

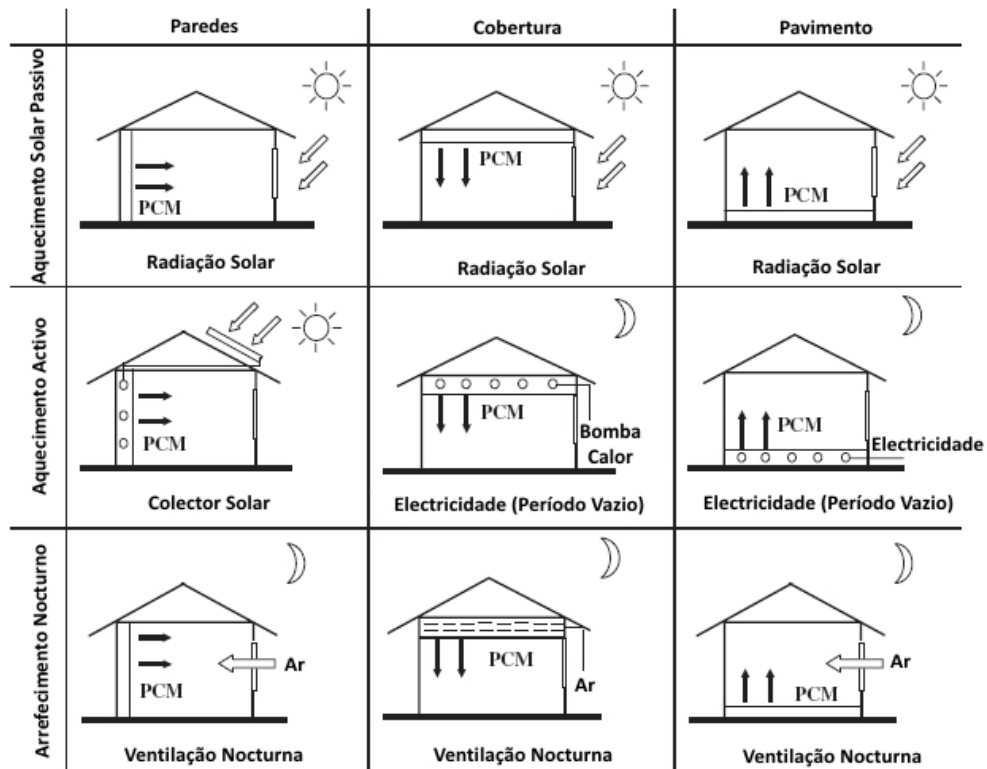


Figura 22: Localização da aplicação e função dos PCMs em edifícios [61, 68]

Existem duas formas de incorporar os PCMs na construção, diretamente relacionadas com a forma como a energia térmica é transmitida, seja por radiação ou por convecção. Quando se pretende o fenómeno de radiação procedesse geralmente à incorporação de PCMs em paredes, pavimentos ou tetos, tanto na forma passiva, funcionando com base no conceito da arquitetura solar, como na forma ativa, através da articulação com sistemas de ventilação natural ou circulação de fluidos, funcionando como sistema híbrido. Por sua vez, o fenómeno de convecção é explorado através da utilização dos PCMs como meio de transferência em sistemas de ventilação e ar condicionado, nos quais se faz passar uma corrente, quente ou fria, no seio do PCM ou por contacto direto em contracorrente com uma suspensão de PCM.

Neste trabalho apenas tem interesse focar-se a utilização dos PCMs através do fenómeno de radiação, na forma passiva, com base no conceito da arquitetura solar.

### 5.2.1. Painéis de gesso cartonado

A envolvente vertical dos edifícios é um dos elementos construtivos preferenciais para a análise das potencialidades dos PCMs na construção, em particular a sua incorporação em painéis de gesso cartonado e em revestimentos à base de gesso. A utilização deste tipo de soluções em paredes divisórias de edifícios com baixa massa térmica tem sido alvo de intensa investigação, resultando no desenvolvimento de alguns produtos já disponíveis no mercado.

Painéis de gesso impregnados com PCMs podem ser instalados no lugar de painéis comuns durante a construção nova, ou durante a reabilitação de um edifício, o que aumenta significativamente as áreas de armazenamento térmico para aquecimento/arrefecimento solar passivo, permitindo a diminuição das cargas de arrefecimento e aquecimento mecânico. Desta aplicação resultarão pouco ou nenhum custo adicional decorrente da instalação de painéis com PCMs no lugar do gesso comum [33].

Athienitis *et al.* [69] analisaram o comportamento de uma célula de teste constituída por painéis de gesso cartonado impregnados de PCM (25% em massa e temperatura de transição entre 17-21°C), sujeita à temperatura exterior durante o Inverno. A temperatura interior da célula de teste foi mantida a 23 °C durante o dia e 16 °C durante a noite. Constatou-se uma redução na temperatura máxima de 4 °C com a incorporação de PCMs. Quando comparada, a solução com PCMs permitiria reduzir em 15% o consumo de energia para aquecimento.

Darkwa *et al.* [70] investigaram o comportamento de duas soluções distintas incorporando PCMs. Compararam painéis de gesso cartonado, com 12 mm de espessura, impregnadas com PCMs, com placas de gesso cartonado simples, com 10 mm de espessura, revestidas por lâminas de PCM com 2 mm. A quantidade de PCMs usada era, em ambos os casos, de 17%. Os resultados obtidos permitiram concluir que a utilização de PCM laminado é mais eficiente no que diz respeito à utilização da energia latente, tendo esta solução contribuído para um aumento de 17% da temperatura interior mínima.

Chen *et al.* [71] sugeriram a aplicação de um novo PCM, incorporado em painéis de gesso cartonado, no interior de uma parede orientada a norte de uma célula de teste.

O resultado indica que a aplicação de PCM adequada à superfície interna da parede norte da sala não só pode melhorar muito o conforto térmico interior, como também aumentar a taxa de utilização da radiação solar, de modo que o consumo de energia de aquecimento é reduzido e a meta de economia de energia é alcançada. Durante o dia, a temperatura máxima atingida foi de 25,5 °C no lado de referência e de 24 °C no lado do PCM.

A adoção desta solução no inverno, utilizando painéis com 30 mm de espessura e PCM com temperatura de transição de 23 °C, demonstrou um potencial de poupança energética de 17% com base numa temperatura de conforto de 20 °C.

Kalousck e Hirs [72] desenvolveram um caso de estudo, no qual comparam o conforto térmico simulado em duas salas no sótão de uma casa durante o verão, onde a primeira sala é constituída por gesso convencional e a segunda com painéis impregnados de PCM. Foi utilizado um PCM com ponto de fusão de 29°C, com uma aplicação a 70% PCM e 30% em gesso. Conclui-se deste estudo que o painel com PCM poderia manter o conforto térmico de verão na sala sótão da casa, onde se verificou que a temperatura da superfície e a temperatura do ar na sala diminuiu 3,5 e 2,5 °C, respetivamente.

Oliver *et al.* [73] estudaram a conformidade da inclusão de PCMs em painéis de gesso para multiplicar a sua capacidade de armazenamento de energia térmica. A influência de diferentes parâmetros e variáveis do sistema (temperatura ambiente, velocidade do ar, exposição de materiais de mudança de fase e localização no edifício), foram estudadas para estabelecer um sistema de armazenamento de calor latente que, complementado com estratégias passivas (ganhos solares, ventilação natural), poderia reduzir o consumo de energia em edifícios. Este estudo demonstrou que um painel de gesso com 1,5 centímetros de espessura, incluindo 44,5% do seu peso em PCM, é capaz de armazenar cinco vezes mais energia térmica do que um painel de gesso atual com a mesma espessura, ou uma parede de tijolo com 11,5 cm de espessura na faixa de conforto (20-30 °C), mantendo as propriedades mecânicas e físicas necessárias.

A incorporação de microcápsulas de PCM em pastas de gesso é outra das soluções que tem sido investigada para o revestimento de paredes. Schossig *et al.* [74] construíram duas células de teste, cujas paredes foram revestidas internamente com gesso projetado, com e sem PCM.

Durante o decorrer da experiência, foram testadas duas soluções: um revestimento com 6 mm de espessura, incorporando 40% de PCM, e um outro, com 15 mm de espessura incorporando 20% de PCM; em ambos os casos o PCM utilizado apresentava uma gama de temperaturas de transição entre os 24-27 °C.

Durante o período monitorizado com o revestimento de 6 mm verificou-se uma temperatura interior máxima, na célula com PCM, de cerca de 4 °C mais baixa, sendo esta atingida com um desfasamento de 1 hora mais tarde, Figura 23. Com sombreamento, proporcionado por estores interiores, as diferenças registadas foram de apenas 2 °C. O contributo do PCM para o conforto térmico foi de tal forma significativo que, durante um período de três semanas, apenas se registaram temperaturas superiores a 28 °C durante cerca de 5 horas na célula com PCM, em detrimento das cerca de 50 horas na célula de referência.

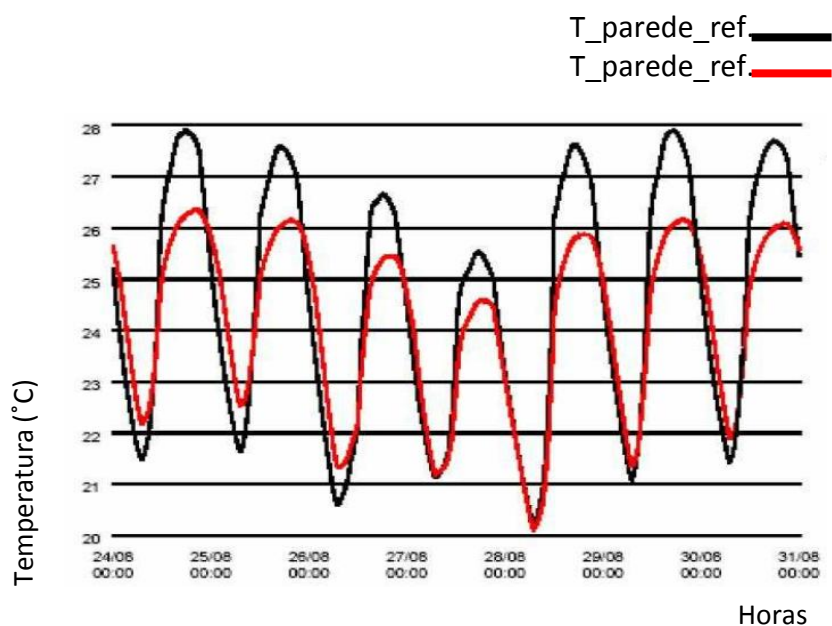


Figura 23: Comparação dos resultados de temperaturas obtidas para uma solução com e sem incorporação de PCM [74]

### 5.2.2. Paineis sandwich

O uso de PCM em painéis sandwich, caracterizados por terem baixa inércia térmica, pode constituir a solução para os problemas de sobreaquecimento dos edifícios leves. A adição de PCMs nestes painéis irá aumentar a inércia térmica das paredes, absorvendo o calor quando a parede é submetida à radiação solar. Esta solução construtiva é muito

utilizada em instalações industriais que apresentam grandes variações de temperatura, já que não têm sistemas de arrefecimento.

Foram testados diferentes protótipos de painéis sandwich contendo PCMs e os resultados alcançados demonstraram um bom comportamento e uma grande melhoria aquando da adição de uma camada de ar entre o PCM e o metal [75, 76].

### 5.2.3. Painéis de madeira e betão

A baixa inércia térmica dos edifícios leves implica a ocorrência de variações de temperatura elevadas, sendo a aplicação de PCMs em tais edifícios muito promissora, devido à sua capacidade para suavizar as variações de temperatura [77].

Um exemplo foi desenvolvido por Mehling *et al.* [78], onde foi estudada a inclusão de PCMs em painéis de madeira e betão, que consiste numa mistura de cimento, pedaços de madeira ou serragem, água e aditivos. Apresenta um bom isolamento térmico (com coeficiente de condutibilidade térmica entre 0,150 e 0,750 W/m.K), um bom isolamento acústico, boas propriedades mecânicas (densidade entre 600 e 1700 kg/m<sup>3</sup>) e uma capacidade de calor entre 0,390 e 0,480 kJ / kg. ° C com uma densidade de 1,300 kg/m<sup>3</sup>.

A combinação entre a madeira leve de betão e o PCM aumentaria a capacidade de armazenamento térmico e ajuda na obtenção de elementos de parede mais leves e mais fina, com desempenho térmico melhorado. O PCM escolhido para tal aplicação foi o Rubitherm granulado GR 40, (1-3 mm), e GR 50, (0,2-0,6 mm). Misturas de madeira de 20% substituído por parafina, ou misturas com mais de 20% de PCM foram testadas.

Desta experiência pode concluir-se que o PCM pode ser combinado com os painéis de madeira e betão não apresentando as respetivas propriedades mecânicas mudanças significativas.

### 5.2.4. Envidraçados

Têm sido realizadas várias pesquisas sobre a utilização de PCMs em vãos envidraçados. Ismail [79] propõe um sistema constituído por um vidro duplo com caixa-de-ar e enchimento em PCM, associado a uma bomba e a um tanque de PCM. O PCM, mantido no tanque em estado líquido, é bombeado e solidifica no espaço entre os vidros,

formando uma janela de vidro duplo com PCM em vez de ar no espaço entre os vidros, impedindo o calor de se dissipar através da janela e mantendo a temperatura interior. Quando o espaço entre os vidros é completamente cheio de PCM atinge-se uma redução total de 55% no consumo de energia [61, 64].

Weinlader [80] também realizou experiências de modo a analisar a influência de um painel de PCM aplicado no interior de envidraçados duplos de acordo com a Figura 24, tendo registado transmitâncias na ordem de 40%. Com os ganhos solares a diminuírem em cerca de 50%, a incorporação de PCM resultou numa redução de 30% nas perdas térmicas em fachadas orientadas a sul [61].

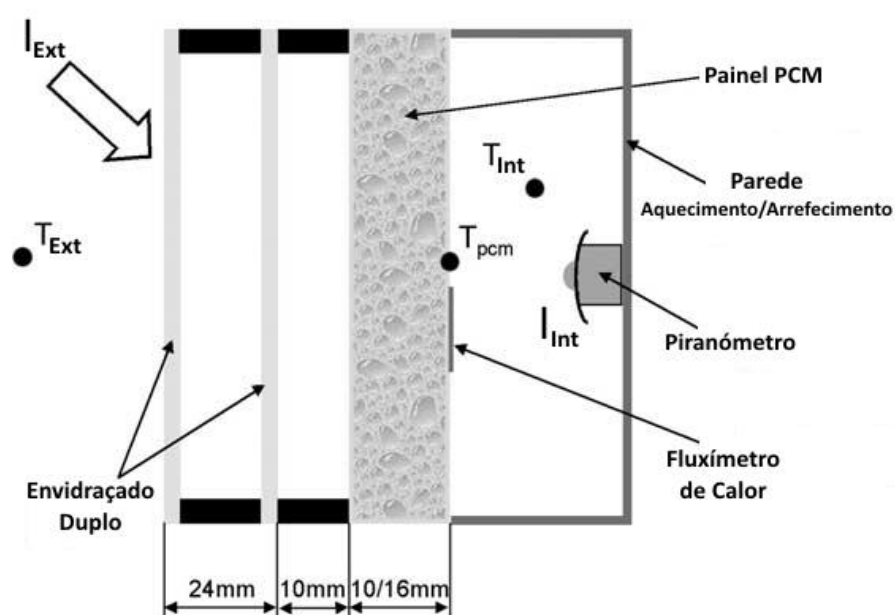


Figura 24 : Esquema representativo da janela desenvolvida por Weinlader [61, 80]

### 5.2.5. Proteção solar

Neste conceito, o obturador contendo PCM é colocado fora das áreas de janela. Durante o dia eles são abertos para o exterior e o lado exterior é exposto à radiação solar, o calor é absorvido e derrete o PCM. À noite, fecha-se o obturador e deslizam-se as janelas, irradiando o calor do PCM para os compartimentos. Buddhi e outros estudaram o desempenho térmico de uma célula de ensaio, com e sem material de mudança de fase, tendo concluído que a capacidade de armazenar calor da célula devido à presença de PCM aumenta até 4 °C para 4-5 horas [33].



### 5.2.6. Betão

As primeiras experiências de aplicação de PCMs em betão tinham como objetivo o aumento da capacidade de armazenamento de energia do betão para utilização em edifícios residenciais ou comerciais, através da incorporação de PCMs com temperaturas de transição, próximo das temperaturas de conforto.

Outros estudos foram realizados com o objetivo de controlar a temperatura durante o processo de cura do betão, através da utilização de microcápsulas de PCMs, incorporando um retardador de presa. A brusca subida de temperatura associada à hidratação inicial do cimento pode ser diminuída através da absorção de energia durante a fusão do PCM, enquanto a libertação controlada do retardador de presa diminui a velocidade de hidratação e a consequente, libertação de calor da mistura.

Uma outra aplicação está relacionada com a diminuição do número ou intensidade dos ciclos de gelo-degelo a que está sujeito o betão durante o inverno, através da utilização de um PCM com temperatura de transição em torno dos 5 °C, conduzindo assim a um aumento da durabilidade [61].

Cabeza *et al.* [81] analisaram o comportamento de células de teste em betão Figura 25, sem e com a incorporação de 5% em massa de microcápsulas de PCM com temperatura de transição de 26 °C. O betão com incorporação de PCM foi aplicado na cobertura e nas paredes orientadas a sul e a oeste. Durante o verão, e na ausência de ventilação, foram registados 3 °C de diferença na temperatura superficial máxima da parede orientada a oeste, com um desfasamento temporal de 2 horas.



Figura 25: Células de teste em betão com incorporação de PCMs [81]

Shi *et al.* [82] estudaram experimentalmente o uso do PCM na forma de parafina no betão para evitar fissuras de origem térmica. A resistência à compressão e à permeabilidade do betão com PCM foram testados e a estrutura de poros microscópicos também foi investigada. A porosidade total da argamassa com PCM não sofreu grandes

alterações comparativamente com o de argamassa comum. No entanto, o diâmetro dos poros aumentou e a temperatura máxima da argamassa também diminuiu pela adição de PCM. Além disso a taxa de processo de aumento da temperatura e do processo de queda de temperatura foram reduzidos, podendo-se evitar com maior probabilidade a formação de fissuras devido à oscilação de temperatura no betão.

#### 5.2.7. Tijolos e Blocos

Com o objetivo de melhorar o desempenho térmico de coberturas planas, Lai [83] investigou a influência da incorporação de PCMs (uma parafina denominada octadecano) em tijolos perfurados. Valores obtidos durante o verão permitiram verificar que para temperaturas máximas exteriores de 26,5 °C, 32,0 °C e 35,5 °C, as temperaturas máximas na parte inferior dos tijolos tratados com PCMs foram de 24,3 °C, 29,8 °C e 31,7 °C, cerca de 2,2 °C, 3,4 °C e 4,9 °C inferiores aos valores registados com tijolos convencionais.

Alawadhi [55] estudou numericamente o comportamento de um compósito tijolo-PCM para climas quentes. O PCM foi introduzido nos orifícios cilíndricos dos tijolos, em quantidades diferentes. De modo a avaliar a eficácia térmica, o fluxo de calor interno do tijolo-PCM e os tijolos convencionais foram comparados. Os resultados mostraram uma redução do fluxo de calor até 24,2% quando se utiliza a melhor configuração. Um aumento na quantidade de PCM resultou numa maior economia, sendo o eixo do tijolo a melhor localização para a sua colocação.

#### 5.2.8. Parede de trombe com incorporação de PCMs

A parede de trombe é um exemplo primordial de uma abordagem de ganho indireto, enquanto que os PCMs são de aplicação recente mas muito eficiente nos edifícios. A tradicional parede de trombe, é um elemento de armazenamento de calor sensível, enquanto que os PCMs permitem armazenar calor latente e aumentam o potencial para o armazenamento de maior quantidade de calor por unidade de massa. Desta forma a parede trombe com PCM é um conceito atraente que aguarda uma aplicação bem sucedida.

Torna-se este tema, um assunto extremamente interessante para possíveis trabalhos futuros nesta área, uma vez que a conjugação dos dois sistemas apresentados neste trabalho seria a solução ideal.

Os princípios em que este sistema se baseia passam pela construção de uma parede com incorporação de PCM na fachada sul de um edifício, a parede é aquecida durante o dia pela radiação solar incidente, entrando o PCM em fusão. À noite, quando o PCM solidifica, vai libertar o calor armazenado para aquecer o edifício.

Para uma determinada quantidade de armazenamento de calor, as unidades de mudança de fase requerem menos espaço do que paredes de água ou paredes maciças, e são muito mais leves. Nas paredes de trombe com PCM já testadas foram utilizados sal e hidratos de hidrocarbonetos.

Os PCMs têm sido utilizados para substituir a alvenaria nas paredes de Trombe, Askew [53] utilizou um painel coletor feito de uma placa fina de cera de parafina aplicadas por trás do vidro duplo do prédio e descobriu que a eficiência térmica é comparável com a dos coletores planos convencionais. Farouk e Guceri [84] estudaram a utilidade da parede PCM instalada num edifício para aquecimento doméstico noturno usando uma mistura de sal e SUNOCO P-116 (cera). Observou-se que se a parede PCM é projetada de forma adequada, elimina algumas das características indesejáveis das paredes de alvenaria, com resultados comparáveis. Bourdeau [85] testou duas paredes de armazenamento usando hexahidrato de cloreto de cálcio (ponto de fusão 29 °C) como material de mudança de fase. Ele concluiu que 8,1 centímetros de parede com PCM têm um desempenho térmico ligeiramente superior ao de uma parede de alvenaria de 40 cm de espessura.

Swet, Ghoneim *et al.* e Chandra *et al.* [86-88] utilizaram sulfato de sódio decahidrato (ponto de fusão 32 °C) como material de mudança de fase numa parede de trombe, localizada na fachada sul de um edifício. Eles também relataram que a parede com PCM de menor espessura foi mais eficiente, em comparação com uma parede de alvenaria ordinária para a prestação eficiente de armazenamento de energia térmica.

Knowler [89] testou ainda a possibilidade de incorporação de aditivos metálicos a uma cera de parafina, para aumentar a condutividade e a eficiência global da parede com PCMs.

Buddhi [90] mediu a transmitância da radiação solar através dos materiais mudança de fase para diferentes temperaturas e espessura. Ácido esteárico foi usado como um material de mudança de fase. Eles descobriram que a transmitância do material de mudança de fase foi mais do que a do vidro para a mesma espessura e sugeriu uma nova aplicação de material de mudança de fase nas janelas ou envidraçados como um material transparente isolante.

Stritih e Novak [91] apresentaram uma parede solar para aquecimento do edifício, que absorve a energia solar através da cera de parafina (ponto de fusão, 25-30 °C). A eficiência da absorção alcançou os 79%. O resultado da simulação mostrou que o painel dita a quantidade de calor armazenado como sensível ou latente e que o ponto de fusão do PCM tem uma influência sobre a temperatura do ar de saída.

Castellón *et al.* [92] estudaram uma parede trombe aplicada na fachada sul, a fim de investigar se o efeito do PCM pode ser usado durante todo o ano num clima mediterrâneo para reduzir tanto a refrigeração como o aquecimento. Os autores recomendaram o uso da parede trombe de abril a junho e de outubro a novembro ou dezembro. Sendo assim estudo o potencial do sistema para armazenamento de energia solar térmica comparativamente àquele que iguais espessuras de matérias correntes, utilizados na construção, apresentam.

Constata-se assim que é muito mais eficiente e rentável a utilização de placas de PCMs, em vez das tradicionais paredes maciças, uma vez que, a capacidade de armazenamento de calor de uma placa de gesso com 1,5 cm de espessura é comparável ao de uma parede de 9,0 cm de betão ou a 12,0 cm de parede de tijolo, esquematizado na Figura 26, existindo assim uma excelente gestão da temperatura numa abordagem extremamente leve.

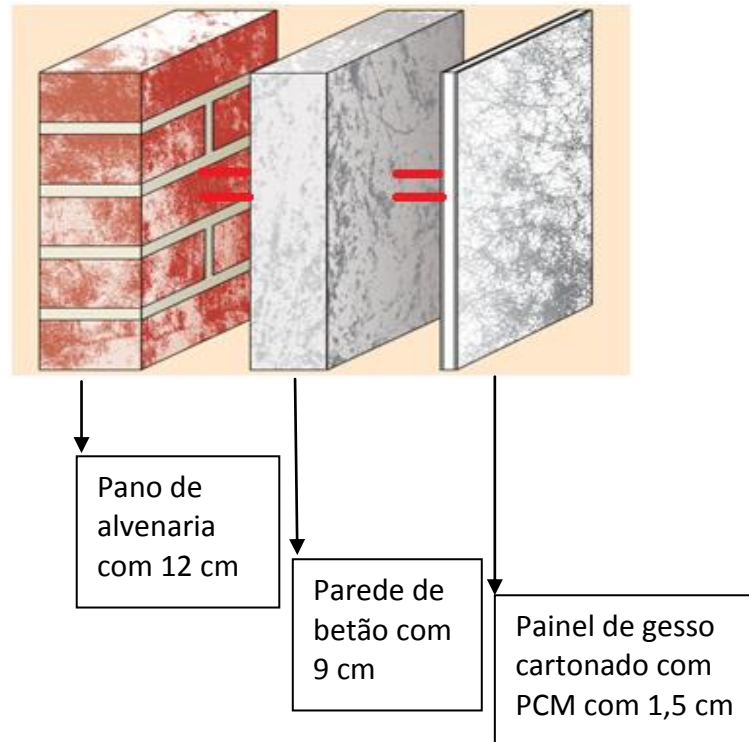


Figura 26: Esquema que estabelece a equititude de três possíveis soluções [93]

### 5.3. Síntese da eficácia de soluções com incorporação de PCMs

A utilização eficiente da energia solar está diretamente relacionada com o método utilizado no seu armazenamento. A utilização de sistemas de armazenamento de energia sob a forma de calor latente para a regulação térmica no interior dos edifícios tem-se tornado uma tecnologia cada vez mais atrativa dadas as suas vantagens. É o caso da uniformização na solicitação da energia da rede, diminuindo assim a carga e eventual colapso dos sistemas de fornecimento; a diminuição dos gastos com a fatura elétrica, pela deslocalização temporal do consumo energético para períodos de vazio; a contribuição para o aumento do conforto térmico no interior dos edifícios, pelo armazenamento e utilização do calor associado à energia solar, em particular para o aquecimento durante o inverno e pelo armazenamento e utilização do fresco associado à ventilação natural noturna, em particular para o arrefecimento durante o verão, reduzindo assim o recurso a sistemas de aquecimento e arrefecimento ativos.

A utilização dos PCMs como mecanismo de armazenamento de energia pode, desta forma, reduzir as variações de temperatura interior, contribuindo para o aumento do nível de conforto interior.

A evidente vantagem da incorporação de PCMs na estrutura dos edifícios resulta do facto destes materiais oferecerem grandes áreas de armazenamento e transferência de energia em todas as zonas do edifício. Uma outra vantagem está relacionada com o modo de incorporação deste material, uma vez que se evita a utilização de invólucros como contentores do PCM. Além disso, a sua incorporação não conduz a custos adicionais, exceto o do material, pois a sua aplicação é efetuada de forma convencional [61].

Com base na revisão bibliográfica apresentada anteriormente, propõem-se de seguida o estudo da aplicação da parede de trombe e dos PCMs no caso de estudo da presente dissertação.

Desta forma o capítulo seguinte descreve os programas de simulação destes dois sistemas passivos que serão estudados.

## Capítulo 6

---

Programas de Análise





---

## 6. PROGRAMAS DE ANÁLISE

### 6.1. PCM Express

O software *PCM express* é um programa de simulação de edifícios que recorre a materiais de mudança de fase.

Este programa efetua a comparação de resultados para a solução existente paralelamente com a solução escolhida com incorporação de PCM. O *PCM Express* fornece aos utilizadores um método simples de definir um sistema com PCMs em estruturas de paredes e tetos. Dependendo da situação, o uso de PCMs pode ser justificado pelo aumento do nível de conforto oferecido (casas particulares com as exigências de bem-estar) ou por razões económicas (edifícios de escritórios). Ambas as estratégias são apoiadas pelo programa, através do uso de menus, uso de perfis pré-definidos e adaptados à apresentação dos resultados.

O programa apresenta oito menus, que permitem a caracterização do ambiente em que o edifício se insere, através de ficheiros com dados de latitudes, longitudes e temperaturas, toda a caracterização dos espaços em si, incluindo as dimensões, os materiais, as cargas interiores e os sistemas de aquecimento e arrefecimento existentes.

Um dos menus, refere-se à biblioteca do programa, onde é apresentada a base de dados sobre todos os materiais e tipos de construções que o programa oferece ao utilizador, existindo a possibilidade de criar novos materiais e construções.

Em termos de soluções construtivas com incorporação de PCMs o programa apresenta soluções de PCMs com temperaturas de fusão de 21, 23 e 26°C, visto que o programa pretende demonstrar a eficiência destas soluções na estação de arrefecimento (verão).

As soluções apresentadas pelo programa com inclusão dos materiais mudança de fase são painéis de gesso cartonado incorporando microcápsulas de PCM da *BASF<sup>R</sup>*, disponível tanto na versão 21 como na versão 23 e 26. Comercializado pela *Knauf<sup>R</sup>*, que se apresenta com a designação comercial, *Micronal PCM SmartBoard 21/23/26*.

A Figura 27 apresenta esquematicamente uma destas placas e a Tabela 5 compila as principais propriedades das mesmas.

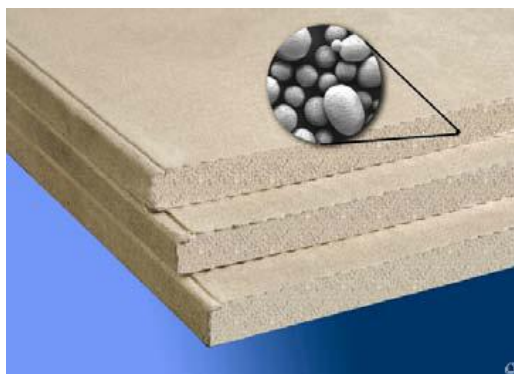


Figura 27: Placas de gesso cartonado com PCMs [61]

Tabela 5: Propriedades do PCM *SmartBoard* [61]

Propriedades	Valor Característico
Dimensões (C x L x E) (mm)	2000 x 1250 x 15
Densidade (Kg/m <sup>2</sup> )	12 ± 0.5
Conteúdo em PCM (Kg/ m <sup>2</sup> )	3
Temperaturas de fusão (°C)	21/23/26
Calor Latente (kJ/m <sup>2</sup> )	330
Calor Específico (kJ/kg. °C)	1,20
Condutividade Térmica (W/m. °C)	0,20

Os dados climáticos utilizados pelo programa são provenientes da base de dados do programa *Meteonorm*<sup>R</sup>, dados estes que também foram utilizados para analisar qual o dia mais quente e mais frio do ano, de modo a serem apresentados os resultados da eficiência dos PCMs para os dias mais agressivos e representativos, da estação quente e fria. Através da análise dos valores climáticos de 2009 a 2011 da base de dados do *Meteonorm* foi possível verificar que o dia mais quente do ano é o dia 21 de Junho e o dia mais frio é o dia 12 de Janeiro. Este resultado foi obtido através da realização da média de temperaturas dos 3 anos para cada mês, e posteriormente da identificação do valor máximo e mínimo correspondente a cada mês.

No menu de definição de parâmetros de caracterização da ventilação existente, das técnicas de arrefecimento e aquecimento, apenas se considera a possibilidade de ventilação natural pelas janelas. Não se considera nenhum tipo de técnica de aquecimento nem refrigeração mecânica, uma vez que o âmbito deste trabalho se baseia na análise de sistemas unicamente passivos. Pretende-se assim desta forma analisar a real eficácia dos PCMs, sem interferência de nenhum sistema ativo.

De seguida no menu de caracterização da geometria do espaço, definem-se as dimensões da envolvente assim como a respetiva orientação. Definindo-se o tipo de matérias e a construção de cada elemento, e optando pela aplicação de PCMs nos elementos que se pretende. Neste trabalho aplica-se PCMs nas paredes interiores e no teto. Por último é apresentado o menu de resultados.

## **6.2. Programa *SLR\_P***

O programa *SLR\_P* de análise energética de edifícios com sistemas solares passivos foi desenvolvido pelo INETI em parceria com o Ministério da Economia. O programa que se apresenta concretiza um método de análise térmica simplificada de edifícios, particularmente para os que utilizam os denominados sistemas de ganho direto, ganho indireto e sistemas combinados.

A denominação de *SLR\_P* resulta da utilização de correlações do tipo SLR (Solar Load Ratio) aplicadas às condições específicas da construção portuguesa.

É um método capaz de quantificar as necessidades energéticas do edifício na estação de aquecimento, bem como o seu balanço térmico de forma a avaliar a qualidade dos diferentes elementos da envolvente. Aplica-se à análise de pequenos edifícios ou zonas independentes de um edifício, para os dois tipos de paredes mais utilizadas em Portugal, alvenaria de tijolo e betão armado.

Este programa é bastante útil na fase de conceção do edifício ou numa fase de reabilitação ou beneficiação térmica, uma vez que é possível testar e comparar diversas soluções, sendo pois uma ferramenta de cálculo muito útil e de simples utilização. O utilizador recorre a menus do próprio programa para escolher as diversas soluções construtivas, tendo a opção de inserir soluções construtivas que não estejam presentes no menu através da introdução do valor do coeficiente de transmissão térmica dos elementos.

Os resultados provenientes destes métodos referem-se, na maioria dos casos, às necessidades de aquecimento, deixando de fora as necessidades de arrefecimento, as condições de conforto ou o sobreaquecimento.

O método consiste na obtenção de um parâmetro SLR, que caracteriza o edifício no âmbito de ganhos e de perdas térmicas em função do tipo de edifício (inércia térmica),

sistema de captação (ganho direto, ganho indireto e tipo de vidro) e do regime de funcionamento (termostático ou de temperatura flutuante)[51, 59].

### 6.2.1. Método de cálculo

Os princípios relativos a este método, baseiam-se na caracterização do edifício num único parâmetro, o SLR, valor este que quantifica a relação entre os ganhos e as perdas térmicas do mesmo.

$$SLR = Q_{sol} / Q_{ref}$$

O  $Q_{sol}$  representa a energia solar absorvida pelo edifício, correspondendo aos ganhos solares através da envolvente translúcida, os sistemas de ganho direto, e aos ganhos das paredes de armazenamento térmico, os sistemas de ganho indireto.

A contabilização dos ganhos solares realizados através dos envidraçados (sistemas de ganho direto), é em função das áreas de fenestração, da radiação solar, a qual depende diretamente da orientação e localização do edifício, bem como do fator solar dependente do tipo de vidro aplicado.

O cálculo dos ganhos realizados através da parede de armazenamento, tem em conta o fator solar do vidro, a área, e o fator de absorção da radiação solar consoante a tonalidade do conjunto de materiais e revestimentos dos compartimentos interiores expostos a essa radiação.

O parâmetro  $Q_{ref}$  representa a carga térmica, cujo valor corresponde ao produto do coeficiente global de perdas sem infiltrações, pelos graus dias de aquecimento.

Para o cálculo do coeficiente global de perdas, considera-se o edifício em regime permanente, necessitando-se apenas das áreas da envolvente, das áreas de fenestração e do valor do coeficiente de transmissão térmica, dependendo este último do tipo de construção e do tipo de vidro. Neste estudo em particular optou-se por se introduzir diretamente o valor do coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente.

Os valores de graus dias de aquecimento encontram-se contabilizados na base de dados do programa.

Outro parâmetro importante contabilizado neste programa é a fração de ganho solar, FS, determinada a partir de correlações do tipo  $FS = f(SLR)$ , dependente do tipo de sistema.

Empregando técnicas de simulação e com base em valores horários climáticos obtiveram-se correlações para duas das tipologias de construção mais utilizadas no nosso país, alvenaria de tijolo e blocos de betão, e para cada uma foram estudados os sistemas de ganho direto, indireto e combinado.

Neste trabalho apresentam-se apenas os valores correspondentes aos ganhos diretos e combinados, obtidos através das seguintes funções:

### **Ganho direto**

Construção da parede em tijolo e vidro duplo

$$SLR \leq 0,4 \quad FS = 0,737 SLR + (0,004)$$

$$SLR > 0,4 \quad FS = 1 - 1,009 \exp(-0,891 SLR)$$

Construção da parede em tijolo e vidro simples

$$SLR \leq 0,4 \quad FS = 0,676 SLR + (0,004)$$

$$SLR > 0,4 \quad FS = 1 - 1,005 \exp(-0,812 SLR)$$

### **Ganho combinado**

Construção da parede em tijolo

$$SLR \leq 0,5 \quad FS = 0,594 SLR + (0,0004)$$

$$SLR > 0,5 \quad FS = 1 - 1,03 \exp(-0,767 SLR)$$

Com o valor de FS, obtêm-se o valor das necessidades de aquecimento,  $Q_{aux}$ , através da fórmula:

$$FS = 1 - Q_{aux}/Q_{ref}$$

Este é o valor de energia que é preciso fornecer ao edifício para compensar a diferença entre as perdas térmicas e os ganhos solares úteis, apresenta-se numa base mensal para regime de funcionamento termostático [94].

## **6.2.2. Dados climáticos**

As condições climáticas do local de implantação do edifício, e a qualidade da envolvente, condicionam os ganhos e as perdas através da envolvente de um edifício. Desta forma em termos do programa  $SLR_P$ , é necessário o conhecimento de

determinados parâmetros do local, tais como: o número de graus dias de aquecimento, a temperatura do solo, a radiação global no plano horizontal e nos planos verticais orientados a sul, este, oeste, nordeste e sudeste.

O programa apresenta uma base de dados climáticos construída a partir de informação publicada pelo Instituto de Meteorologia. Aquando da criação do programa os valores de radiação solar apenas eram registados em algumas cidades como Bragança, Porto, Coimbra, Lisboa, Évora e Faro, pelo que para as restantes localidades foram estimados valores a partir dos dados de insolação e restante informação que se encontrava disponível [59].

### Graus dias de aquecimento

O valor de graus dias de aquecimento é obtido através do conhecimento da temperatura do ar da localidade que se pretende e do valor de uma determinada temperatura base.

Os valores tabelados para o número de graus dias de aquecimento são referentes ao período de 1 de outubro a 31 de maio e foram calculados considerando duas temperaturas de base 15°C e 18°C. A temperatura de base 15°C corresponde às condições estabelecidas no anterior Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios publicado pelo Decreto-Lei nº 40/90, de 6 de Fevereiro, atualmente revogado pelo Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de abril (que considera uma temperatura de base de 20°C) enquanto que a de 18°C refere o valor estimado pela norma ISO7730 (2005) para a obtenção de uma sensação de conforto térmico inerente a uma atividade moderada e a um nível típico de vestuário de inverno [59]. Nenhum destes valores aplicados pelo programa se encontra em vigor atualmente, uma vez que o atual Decreto – Lei nº 80/2006 de 4 de abril, considera a temperatura interior de referência igual a 20°C para o inverno e 25°C para o verão.

### Radiação solar

Nas cidades referidas anteriormente onde existiam valores horários de radiação solar, utilizaram-se as observações correspondentes ao período compreendido entre 1982-1987, encontrando-se editadas na publicação “*EUFRAT Solar Radiation Data*”.

Para as restantes localidades a radiação global foi estimada a partir dos valores médios mensais da percentagem de insolação [59].

### *Temperatura do solo*

Pela inexistência de valores de temperatura do solo para todas as localidades em que foi possível estimar os valores de radiação solar, atribuíram-se valores correspondentes aos da estação meteorológica mais próxima. Os valores das temperaturas do solo utilizados são relativos a uma profundidade de 0,1 m [59].

Reúnem-se agora todas as condições para se proceder à aplicação do caso de estudo, apresentado no capítulo seguinte.





## Capítulo 7

---

Caso de Estudo



---

## 7. CASO DE ESTUDO

### 7.1. Enquadramento

No presente trabalho pretende-se demonstrar a eficiência da aplicação de elementos passivos num edifício de serviços. Desta forma constitui objeto deste caso de estudo o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, considerado um edifício energeticamente ineficiente. Tendo consciência de que os PCMs, por si só, não constituem uma solução passiva suficientemente válida para garantir o conforto térmico no interior do edifício durante a estação de aquecimento e de arrefecimento, optou-se também por considerar neste trabalho a análise dos ganhos térmicos obtidos pela introdução hipotética de uma parede de trombe na estação de aquecimento.

### 7.2. Caracterização do edifício em estudo

Construído no ano de 2004, o edifício em estudo corresponde ao Departamento de Engenharia Civil, integrado no Campus Universitário de Santiago, da Universidade de Aveiro, na zona correspondente à área de expansão sul, localizando-se entre os departamentos de Geociências e de Engenharia Mecânica, Figura 28.



Figura 28: Departamento de Engenharia Civil no Campus Universitário de Santiago

## Forma

A forma deste edifício respeita o estabelecido no plano de ordenamento do Campus Universitário de Santiago: de onde provém a sua forma em paralelepípedo retangular com 20mx80m e com altura de 12m.

## Organização interior dos espaços

O edifício está organizado em três pisos. A entrada principal está localizada no alçado nascente. Existe uma outra entrada no alçado poente e, por fim, uma entrada do laboratório.

Os três pisos do edifício destinam-se a áreas de funcionamento distinto. No piso 0 situa-se a área de laboratório (com pé-direito duplo e salas de apoio técnico às aulas laboratoriais), as áreas de administração e de direção e as instalações sanitárias. No piso 1, situam-se as áreas destinadas às aulas teórico-práticas de computação. No piso 2 situa-se a área destinada aos gabinetes de docentes, as áreas de investigação e pós-graduação, bem como as salas de aulas.

## Estrutura

O edifício é realizado numa estrutura de pilares e vigas em aço laminado a quente e lajes pré-fabricadas em betão do tipo alveolar.

### **Estrutura metálica**

A estrutura metálica é composta por uma linha de pilares que se localiza no perímetro exterior do edifício, com uma modulação definida por um pórtico estrutural de 20mx12m, que se repete a cada 7,2m. Cada pórtico possui dois pilares HEM800 e vigas HEM1000 e 1100, sendo a menor de fecho e travamento do pórtico e a outra de suporte do piso 1, complementado por perfis HEM 400, ao nível do piso 1.

De modo a assegurar-se o equilíbrio estrutural do piso suspenso, e do próprio edifício, é aplicado um sistema de pré-esforço no sentido longitudinal do edifício, na perpendicular ao eixo transversal dos pórticos.

### **Lajes alveolares de betão pré-fabricadas**

As lajes alveolares existentes nos pavimentos do piso 1 e 2 do edifício são constituídas por painéis com 0,20m de espessura e camada de compressão com 0,07m de espessura em zona corrente (betão C25/30).

### **Materiais aplicados**

#### **Envolvente exterior**

As paredes exteriores são constituídas por alvenarias duplas de tijolo tipo B, solidarizadas por meio de pilaretes de betão armado, com exceção do alçado sul, que possui uma fachada ventilada formada por uma grelha cerâmica translúcida.

Os alçados norte, nascente e poente, possuem paredes duplas em tijolo hidrófugo face à vista com dimensões 295 x 110 x 70mm. Os tijolos estão ligados aos elementos de betão armado por meio de ligadores metálicos, de 3 em 3 fiadas.

Ao nível das caixilharias e vãos envidraçados, evidencia-se que na fachada norte ao nível do 2º piso, os vãos envidraçados encontram-se num plano recuado relativamente à fachada do piso 0 e 1. As caixilharias existentes são em perfis de aço galvanizado com pintura anti-corrosão e possuem junta de borracha que efetua a ligação vidro-perfil. Os vidros utilizados nos envidraçados exteriores são duplos, 6 + 12 + 6, do tipo climalit.

O revestimento da cobertura do edifício é constituído por um sistema de painel de chapa metálica tipo sandwich, constituído por um painel metálico de dupla chapa com isolamento térmico no seu interior. As chapas metálicas são galvanizadas a quente e possuem um sistema de pintura adequado a ambientes exteriores muito agressivos e a zonas marítimas.

#### **Envolvente Interior**

A compartimentação do edifício é efectuada através da aplicação de paredes de gesso cartonado, com panos interiores das paredes de tijolo face à vista e por meio de elementos metálicos. As paredes em gesso cartonado são compostas por uma estrutura metálica e dois painéis aparafusados de gesso laminado em cada face. No espaço vazio entre as placas de gesso laminado e a estrutura metálica de suporte existe uma camada de lã de rocha que assegura o isolamento térmico e acústico. No piso térreo, o pavimento

é em betão polido. Nos restantes pisos, as lajes de betão alveolar são cobertas com um revestimento em borracha com isolamento acústico.

### 7.2.1. Compartimento analisado

Tendo em conta que a essência desta investigação se prende com o estudo do aumento da eficiência energética pela aplicação de medidas passivas, opta-se por analisar o compartimento do Departamento que actualmente apresenta condições menos favoráveis em termos de eficiência energética.

Assim, seleccionou-se para análise a sala de estudo localizada no 2º piso do edifício (Figura 29), considerada a mais desconfortável termicamente por possuir uma grande percentagem de área envidraçada orientada a sul. Estas características conferem à sala um clima de desconforto térmico interior considerável, que se caracteriza pelo sobreaquecimento na estação quente, e pelo forte arrefecimento na estação fria.



Figura 29: Sala em análise no 2º piso do Departamento de Engenharia Civil

#### 7.2.1.1. Configuração construtiva

Esta sala é delimitada por duas paredes exteriores, orientadas a este e a sul, constituídas por um pano de alvenaria de tijolo de 11 face à vista, uma caixa-de-ar de 11 cm, um painel de isolamento com 4 cm, seguido de alvenaria de tijolo de 15 cm e por último uma placa de gesso cartonado com 1,5 cm assumindo esta última a função de revestimento da parede.

As duas paredes interiores são constituídas por um painel de gesso cartonado com 1,5 cm de espessura de ambos os lados, com inclusão de uma placa de isolamento de 7 cm de espessura entre o gesso cartonado.

O pavimento é realizado em laje alveolar com 27,0 cm de espessura, betonilha com 4,0 cm e revestimento em vinílico com 0,3 cm de espessura.

A cobertura é constituída por uma lâmina de lã mineral com 5,0 cm de espessura e uma placa de gesso cartonado com 1,5 cm de espessura.

A cobertura é constituída por uma lâmina de lã mineral com 5 cm de espessura e uma placa de gesso cartonado com 1,5 cm de espessura.

### **7.3. Análise da eficiência da aplicação de PCMs**

Mais do que apresentar um sistema de armazenamento de energia que satisfaça as necessidades de energia pontual, pretende-se com este estudo exibir a eficiência dos materiais mudança de fase na redução das necessidades energéticas do edifício de forma passiva e sustentável. A energia armazenada neste sistema não poderá ser convertida em energia útil para os utilizadores do edifício. Não obstante, este sistema permitirá a redução dos consumos de energia necessários para o aquecimento ao transmitir ao meio interior a energia térmica procedente da radiação solar.

De seguida apresentam-se os resultados decorrentes das diferentes simulações da sala de estudo, obtidas através da aplicação do *software PCM Express*.

Conforme tivemos oportunidade de referir na caracterização do programa *PCM Express*, este *software* permite ao utilizador criar tipologias construtivas e materiais à medida. Por conseguinte, no sentido de aproximar a simulação tanto quanto possível à realidade, foi criada na base de dados do programa o tipo de parede exterior e interior, o tipo de cobertura e o tipo de pavimento existente no espaço em estudo (Tabela 6).

Tabela 6: Caracterização da envolvente do compartimento em análise

	Materiais	Espessura (cm)
Parede exterior	Tijolo 11 maciço	11,0
	Caixa de ar	11,0
	Placa de EPS	4,0
	Alvenaria de tijolo de 15	15,0
Parede interior	Placa de gesso cartonado	1,5
	Lã mineral	7,0
	Placa de gesso cartonado	1,5
Pavimento	Vinílico	0,3
	Betonilha	4,0
	Laje alveolar	27,0
Teto	Placa de gesso cartonado	1,5
	Lã mineral	5,0

Relativamente aos materiais mudança de fase utilizados nas simulações, e considerando que o programa limitava-se a soluções de PCMs com temperaturas de fusão de 21, 23 e 26°C, foram criadas na base de dados do *software* soluções construtivas incluindo PCMs com temperatura de fusão de 16°C e 18°C. Pretendeu-se, desta forma, alcançar resultados para a estação de aquecimento. Esta adaptação foi possível através de curvas do ensaio DSC obtidas experimentalmente no Departamento de Química por um "Differential Scanning Calorimeter" (DSC). Estas curvas permitem uma determinação rigorosa das bandas de temperatura de transição do PCM e da sua energia latente (Figura 30 e Figura 31). Através destas curvas foi possível introduzir no programa os valores experimentais, a partir dos quais o programa criou trajetórias aproximadas (Figura 32 e Figura 33).

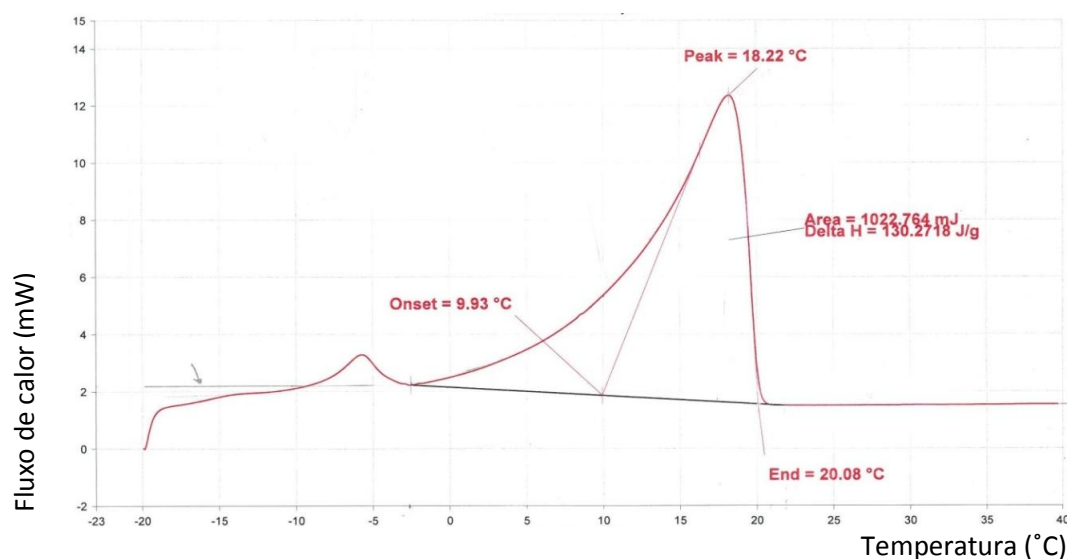


Figura 30: Curva DSC do PCM com temperatura de fusão de 18°C



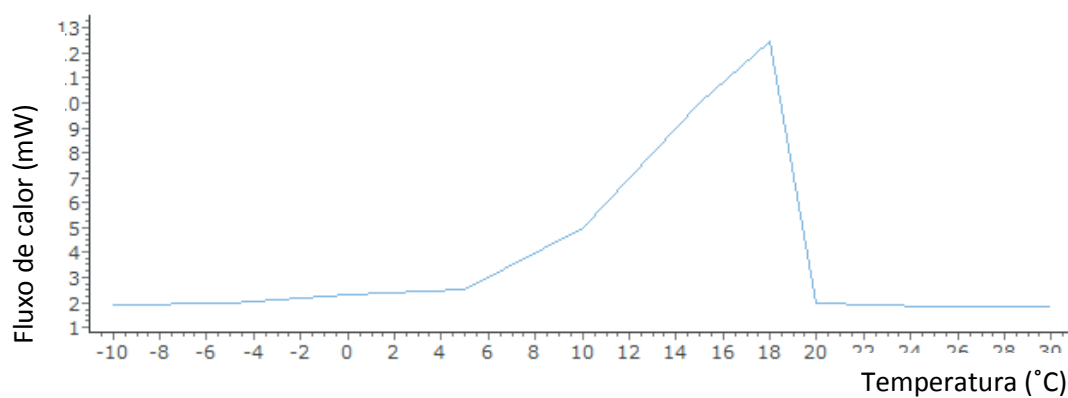


Figura 31: Curva adaptada pelo programa *PCM Express* para uma solução com PCM com temperatura de fusão de 18°C

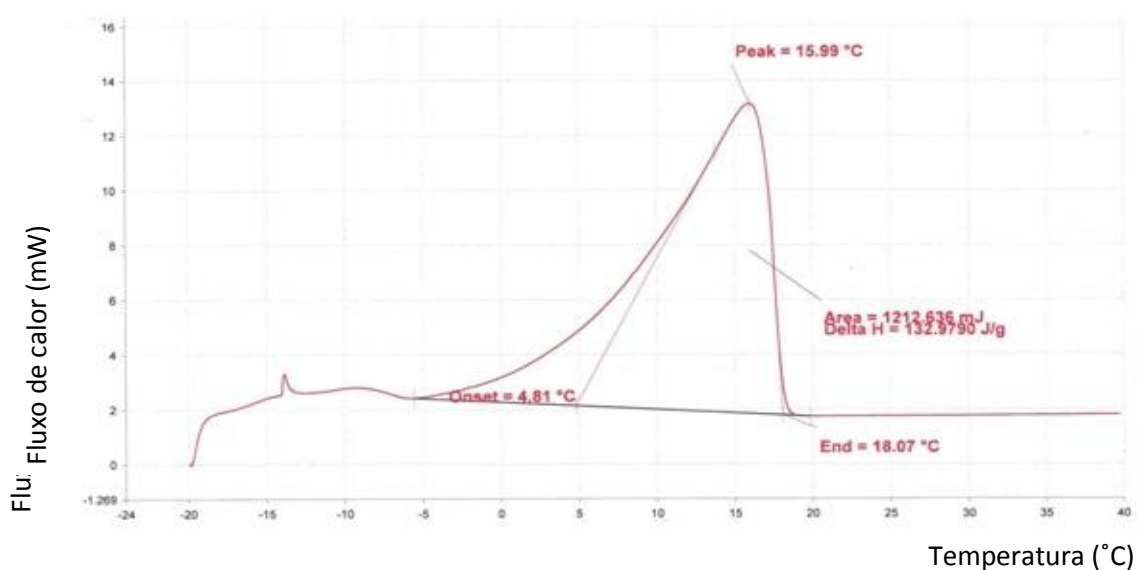


Figura 32: Curva DSC do PCM com temperatura de fusão de 16°C

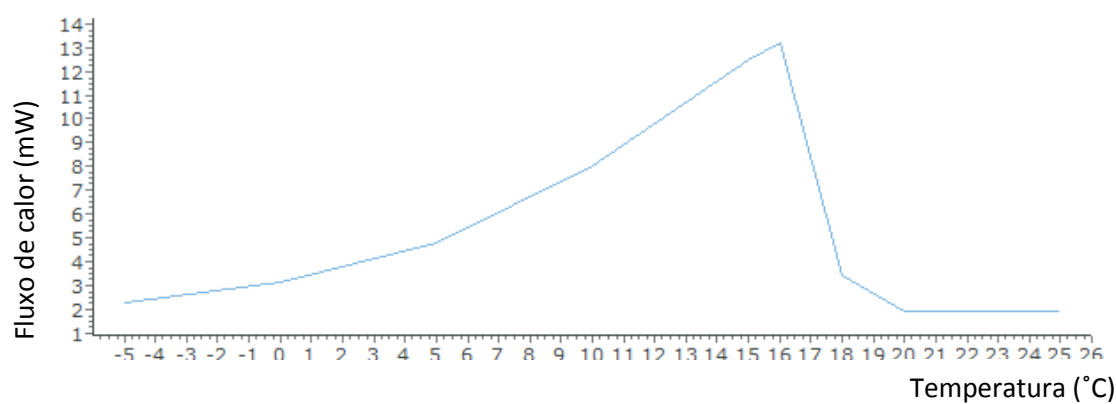


Figura 33: Curva adaptada pelo programa *PCM Express* para uma solução com PCM com temperatura de fusão de 16°C

### 7.3.1. Resultados

Numa primeira fase é avaliada a influência da aplicação de PCMs com temperaturas de fusão elevadas (21, 23 e 26 °C) nas variações térmicas do interior da sala, isto considerando o dia mais quente do ano.

Na segunda fase é efectuado o estudo da aplicação de PCMs com temperaturas de fusão baixas (16 e 18°C). Avalia-se assim a influência da aplicação destes PCMs na variação das temperaturas interiores da sala no dia mais frio do ano. Sabe-se que o programa está pré-definido para analisar a eficiência dos PCMs sobretudo tendo em conta o seu contributo para o controlo do sobreaquecimento. Não há, pois, a pretensão de se alcançar o conforto térmico no interior de um edifício durante todo o ano unicamente com a aplicação de PCMs. Fica demonstrado, através da presente investigação, que os materiais mudança de fase, apesar de muito eficazes, não podem ser aplicados com exclusividade. É importante que o recurso a estes materiais seja conjugado com outras técnicas de aquecimento e de arrefecimento, de modo a obter-se um nível de conforto aceitável.

Quer isto dizer que estes materiais, ao possuírem uma grande capacidade de armazenamento térmico, quando aplicados correctamente e em associação com outras técnicas passivas, permitem não só alcançar um maior conforto térmico, como também eliminar a dependência de fontes de energia de origem fóssil, diminuindo os gastos energéticos e a libertação de gases com efeito de estufa.

A terceira fase é dedicada ao estudo da solução de compromisso. Por conseguinte, opta-se por aplicar tanto um PCM com temperatura de fusão elevada como um PCM com temperatura de fusão baixa (os PCMs são aplicados nas paredes e no teto, de forma alternada). Pretendia-se testar a possibilidade de aplicar uma solução com PCMs exequível em épocas estivais e em épocas mais frias, de inverno.

Os resultados obtidos são apresentados sob a forma gráfica. Introduziu-se nestes instrumentos de representação uma simplificação na legenda de curvas por forma a diferenciar as diversas combinações de PCMs. Assim, a designação do PCM é dada pela sua temperatura de fusão, na qual o primeiro valor corresponde ao PCM aplicado nas paredes e o segundo valor ao PCM aplicado no teto.

O intervalo de conforto apresentado para cada um dos resultados teve como base os valores do RCCTE [31].

### 7.3.1.1. Controlo do Sobreaquecimento

Esta simulação resultou em diversas soluções, uma vez que se testaram diferentes combinações com os PCM 21, 23 e 26. Procurava-se, naturalmente, encontrar-se a solução mais eficiente.

Na Figura 34, encontram-se representadas as distribuições de temperatura das nove combinações possíveis com estes três tipos de PCMs, isto para além da temperatura exterior e da temperatura interior da solução construtiva existente (sem PCMs).

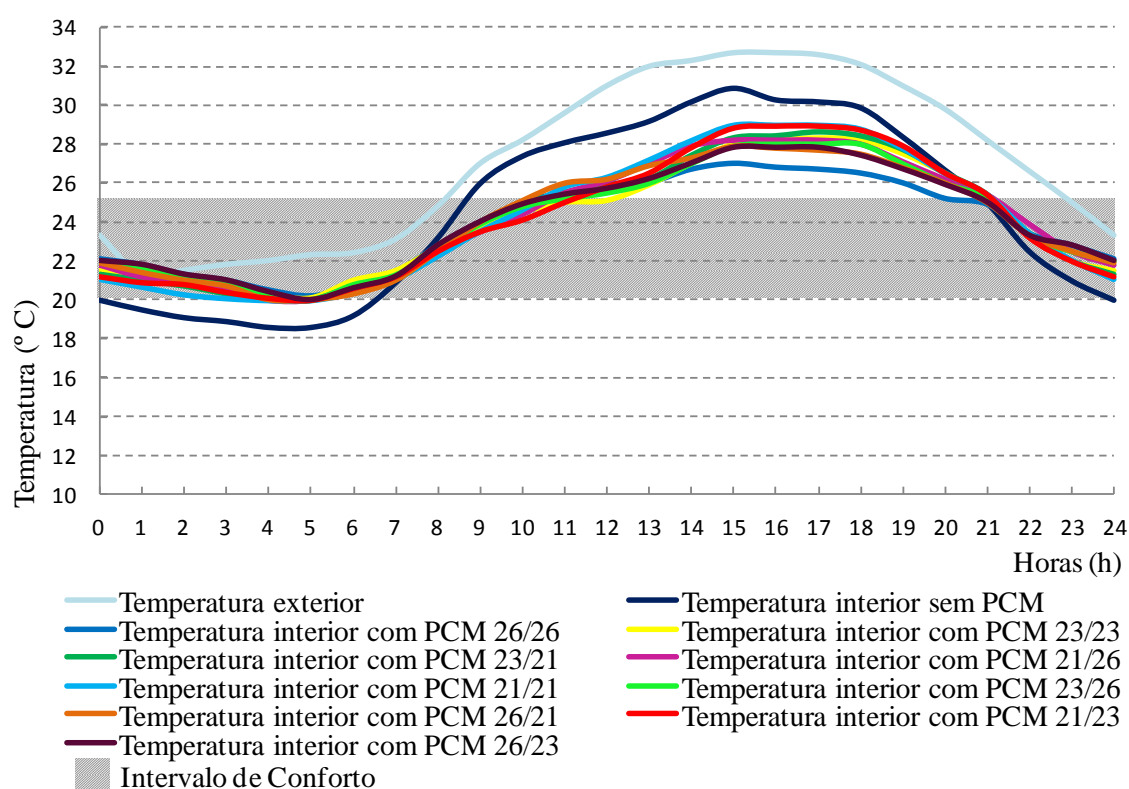


Figura 34: Distribuição de temperaturas para o dia mais quente com as diferentes combinações de utilização de PCMs

Como se pode verificar na Figura 34, de todas as combinações possíveis, a mais eficiente é a que representa a aplicação de PCM 26 em toda a envolvente. Esta é, com efeito, a opção que apresenta resposta mais próxima do intervalo de conforto e apresenta maior amortecimento relativamente à curva de temperaturas da solução existente.

De seguida apresenta-se na Figura 35 a análise da evolução das temperaturas interiores da sala com a solução que incorpora o PCM 26 e a solução existente. Através deste gráfico é possível comparar os resultados de ambas as soluções e avaliar a influência na sinozoide da temperatura da solução com PCMs.

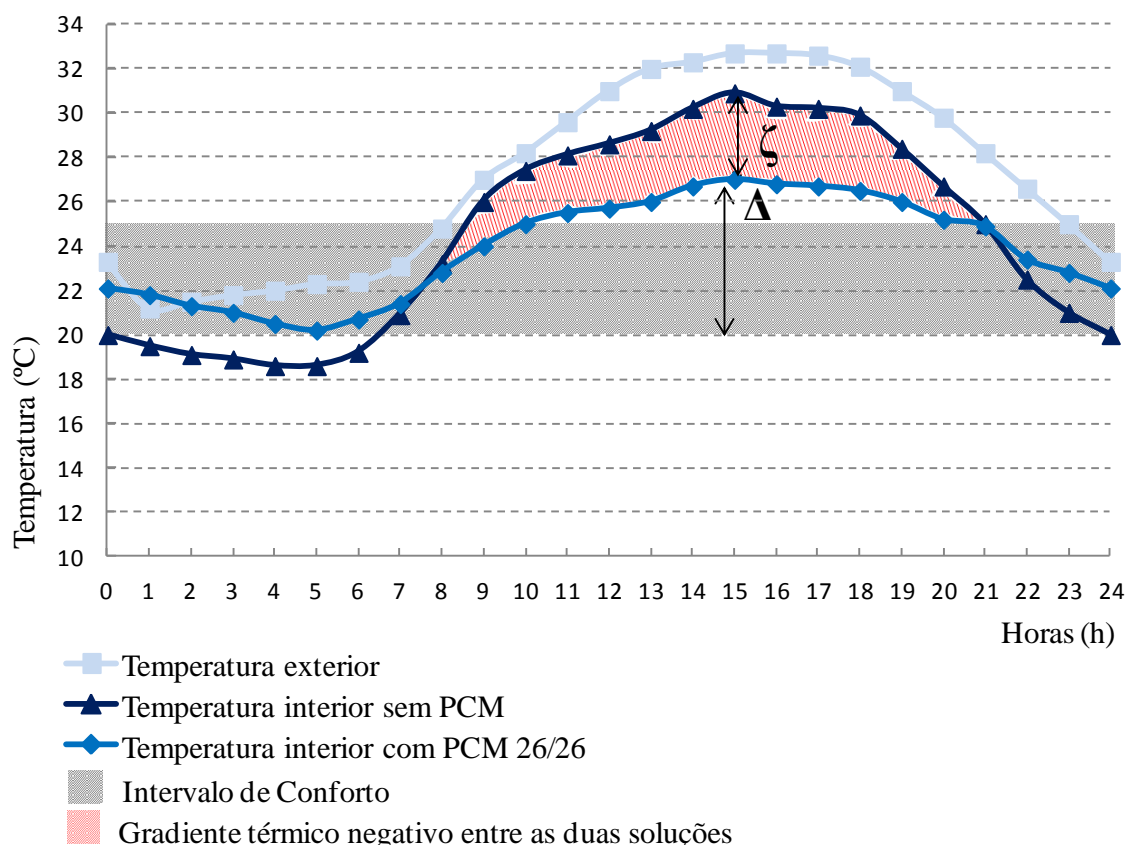


Figura 35: Evolução das temperaturas interiores e exteriores, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 26

De um modo geral, e consoante o previsto, tanto durante o período mais frio como no período mais quente, verificaram-se temperaturas mínimas mais elevadas e temperaturas máximas mais baixas, no espaço com incorporação de PCMs.

Na Figura 35, verifica-se que, para temperaturas na ordem dos 26 °C (início do fenómeno de fusão), a evolução da temperatura interior do espaço com PCMs sofre um desfasamento relativamente à curva de referência, apresentando um aquecimento mais lento e atingindo um pico máximo dentro dos limites de fusão (inferior a 28 °C).

Durante o período mais frio, verifica-se o funcionamento do PCM associado à mudança de fase, onde ocorre a restituição ao meio interior da energia armazenada.

Na solução existente a temperatura no interior da sala subiu até aos 31°C, afastando-se bastante do intervalo de conforto definido.

A incorporação de PCMs, nas soluções construtivas desta sala, possibilita um amortecimento ( $\zeta$ ) da temperatura de aproximadamente 4°C. Esta solução permite ainda uma menor oscilação das temperaturas interiores, devido à menor amplitude térmica ( $\Delta$ ), comparativamente com a solução existente.

### 7.3.1.2. Armazenamento e Inércia

Na estação de aquecimento é importante maximizar os ganhos solares térmico, nesta perspetiva tira-se proveito da grande percentagem de área de envidraçado que constitui a envolvente da sala em estudo, uma vez que possibilita a obtenção de ganhos solares uteis e, simultaneamente, carregar o sistema de armazenamento de energia solar térmica. À medida que a superfície interior da sala fica exposta à radiação solar, proporciona a mudança de fase de sólido a líquido do PCM e armazenar calor latente. Durante a noite, as baixas temperaturas vão promover a mudança de fase de líquido a sólido do PCM, sendo a energia calorífica latente cedida ao interior.

Pretende-se assim nesta segunda análise verificar o nível de eficiência dos PCMs com temperaturas de fusão mais baixas. Como já foi referido anteriormente não é objetivo deste trabalho o alcance de condições de conforto térmico unicamente com a aplicação de PCMs. Apesar de não poder ser considerada uma solução suficientemente eficaz para ser exclusiva, pretende-se sim demonstrar que a aplicação dos PCMs, têm benefícios tanto no verão como no inverno, mas nunca pode ser considerada como uma solução única. Em outros países onde esta técnica já conhece maiores progressos e maior conhecimento científico, os PCMs são apenas utilizados como solução para minimizar o sobreaquecimento. Daí o programa utilizado não incluir na sua base de dados PCMs com temperaturas de fusão mais baixas.

Apresentam-se assim as soluções encontradas para as diversas simulações realizadas através da combinação dos PCMs 18 e 16 , ver Figura 36.

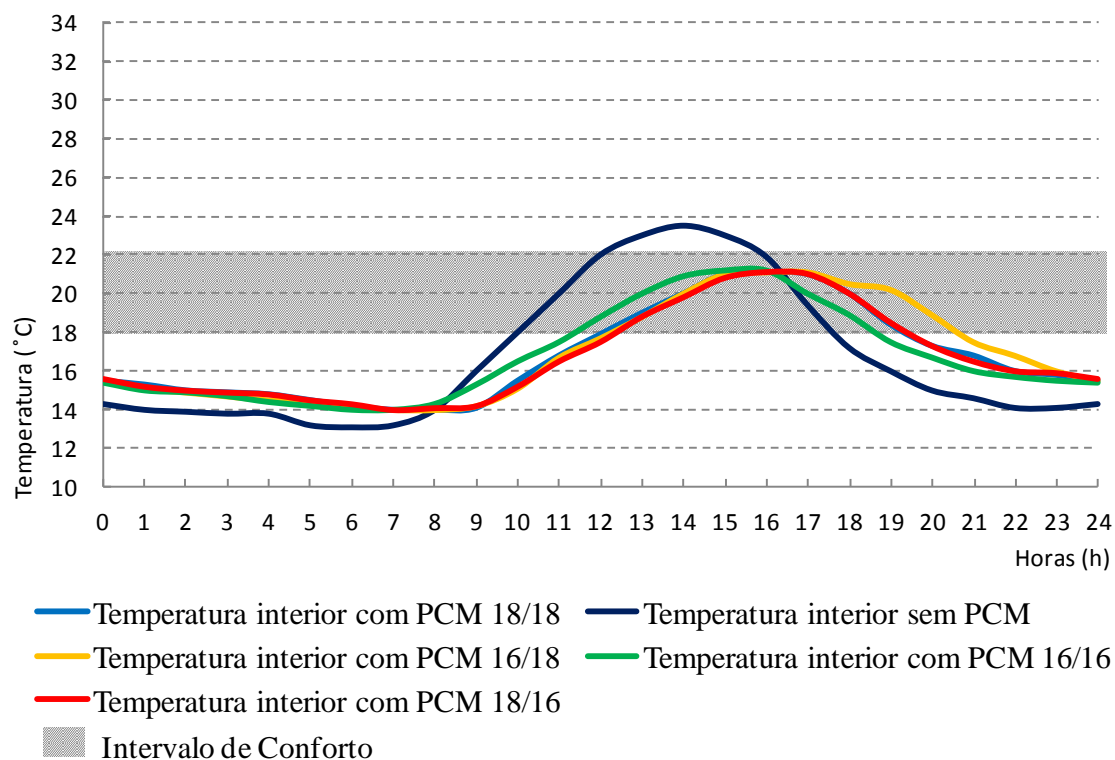


Figura 36: Distribuição de temperaturas para o dia mais frio com as diferentes combinações de utilização de PCMs.

Constata-se assim, que a solução mais eficiente para o dia mais frio do período de aquecimento reside na aplicação do PCM 16 em paredes e PCM 18 no teto, uma vez que é esta solução que se encontra mais enquadrada no intervalo de conforto e apresenta um maior gradiente térmico entre as duas soluções (área assinalada a tracejado vermelho), como esquematizado na Figura 37.

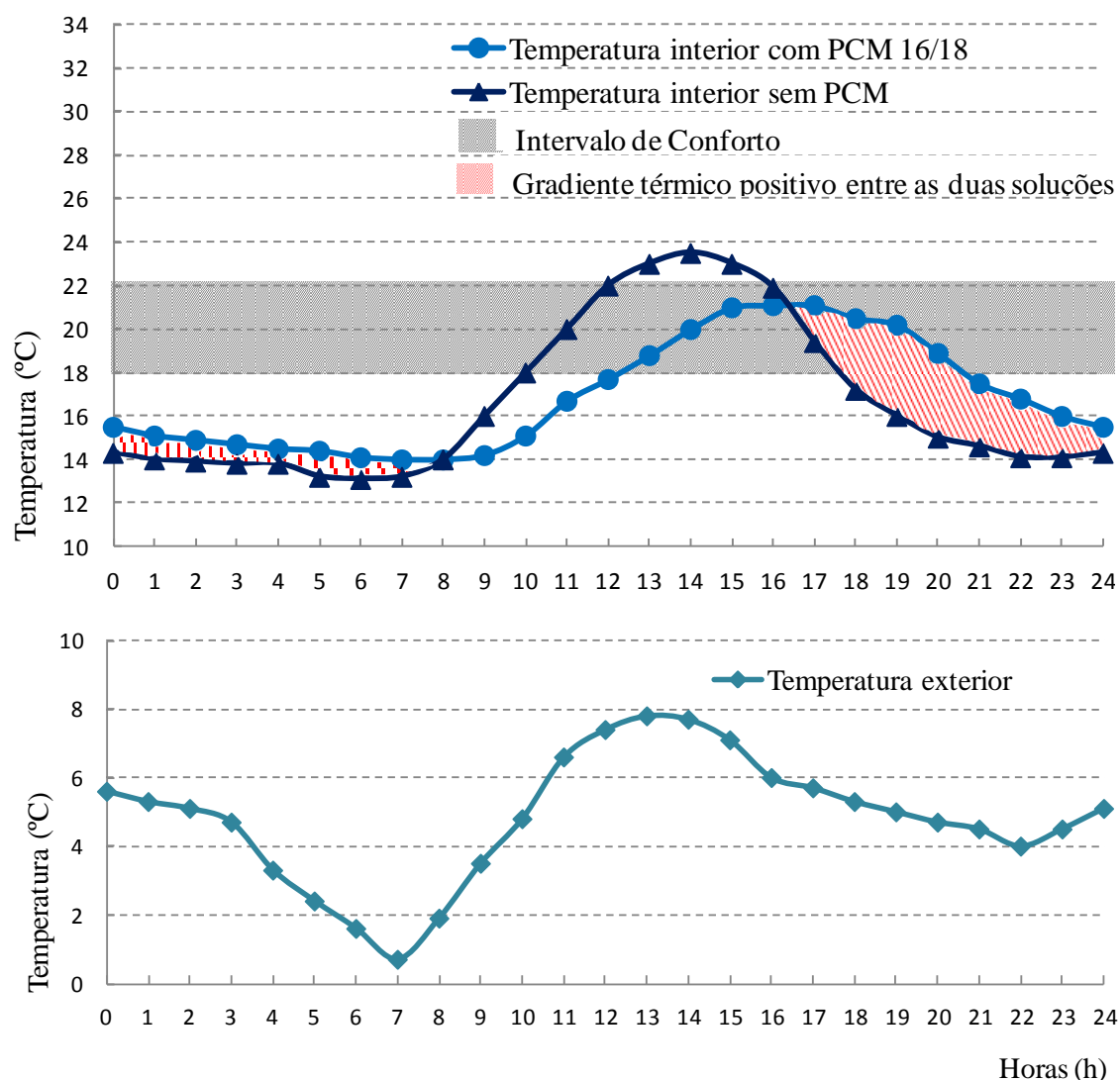


Figura 37: Evolução das temperaturas interiores e exteriores, durante o período mais frio, com a aplicação de PCM 16/18

A quantidade de energia calorífica armazenada está diretamente relacionada com a área definida entre as duas curvas no intervalo horário em que ocorre o processo de descarga do PCM.

Através da análise da Figura 37 é possível verificar através que esta solução consegue obter um ganho térmico na ordem dos 4° C. Por comparação à solução existente, a solução em causa apresenta uma temperatura interior bastante superior durante o intervalo horário em que se pretende que o edifício tenha temperaturas próximas da gama de conforto, dado que já não tem ganhos energéticos provenientes da radiação solar direta. Também é visível um desfasamento de cerca de 3 horas, entre as duas curvas, o que se traduz, na localização do máximo de temperaturas interiores num horário mais favorável ao conforto interno da sala. Este facto, conjugado com a menor

amplitude ( $\Delta$ ) da resposta característica da aplicação de PCM, proporciona uma menor oscilação de temperaturas, permitindo uma maior sensação de conforto aos ocupantes do edifício. No horário noturno, a solução enaltecida consegue uma diferença de temperaturas interiores da ordem dos 2°C, proveniente da restituição ao meio interior da energia calorífica armazenada no sistema durante o dia. Não é um valor muito elevado, mas é positivo, uma vez que se está a analisar um edifício de serviços, em que não se prevê ocupação noturna. Este ganho térmico tem, no entanto, especial interesse para o alcance de uma menor oscilação térmica no interior da sala no ciclo das 24 horas.

### 7.3.1.3. Solução de compromisso

Esta análise compreende um maior número de simulações, resultantes de múltiplas combinações realizadas com os 5 tipos de PCMs incorporados nas soluções construtivas, como ilustrado na Figura 38 e Figura 39.

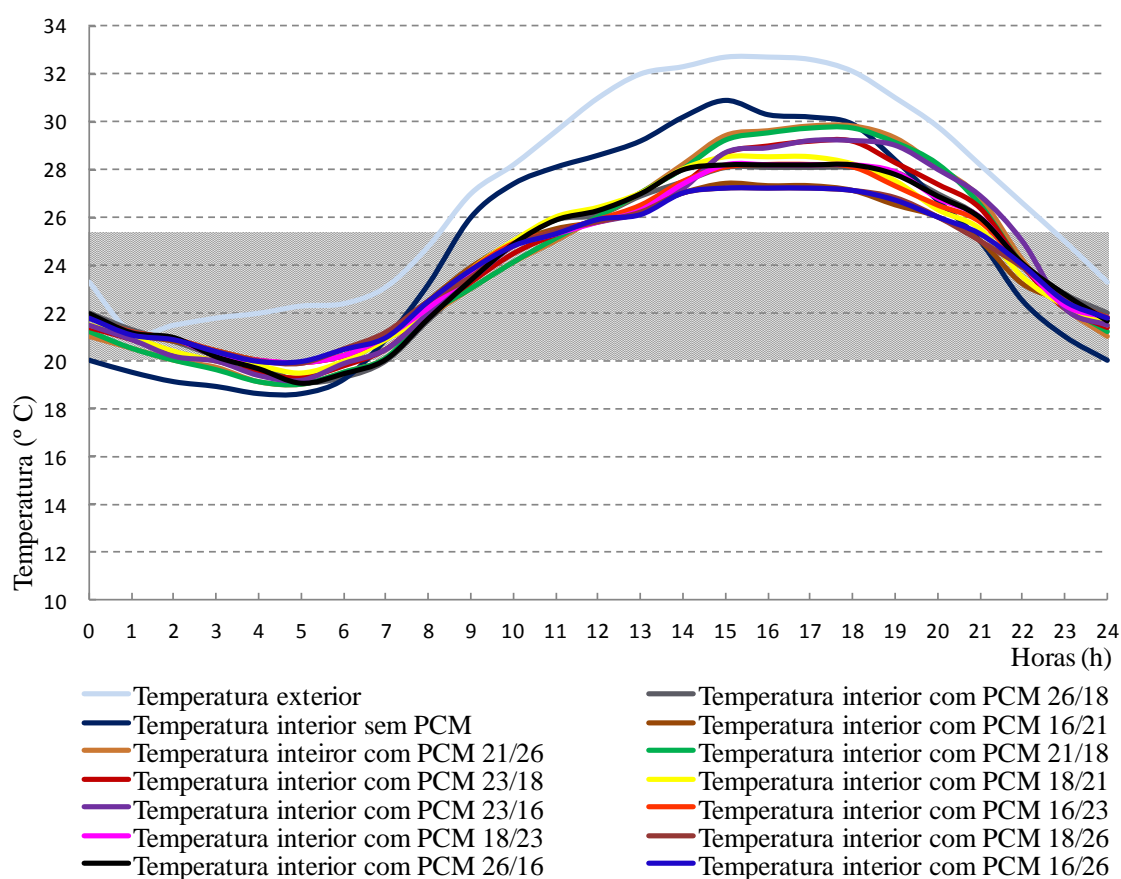


Figura 38: Distribuição de temperaturas para o dia mais quente com as diferentes combinações de utilização de PCMs



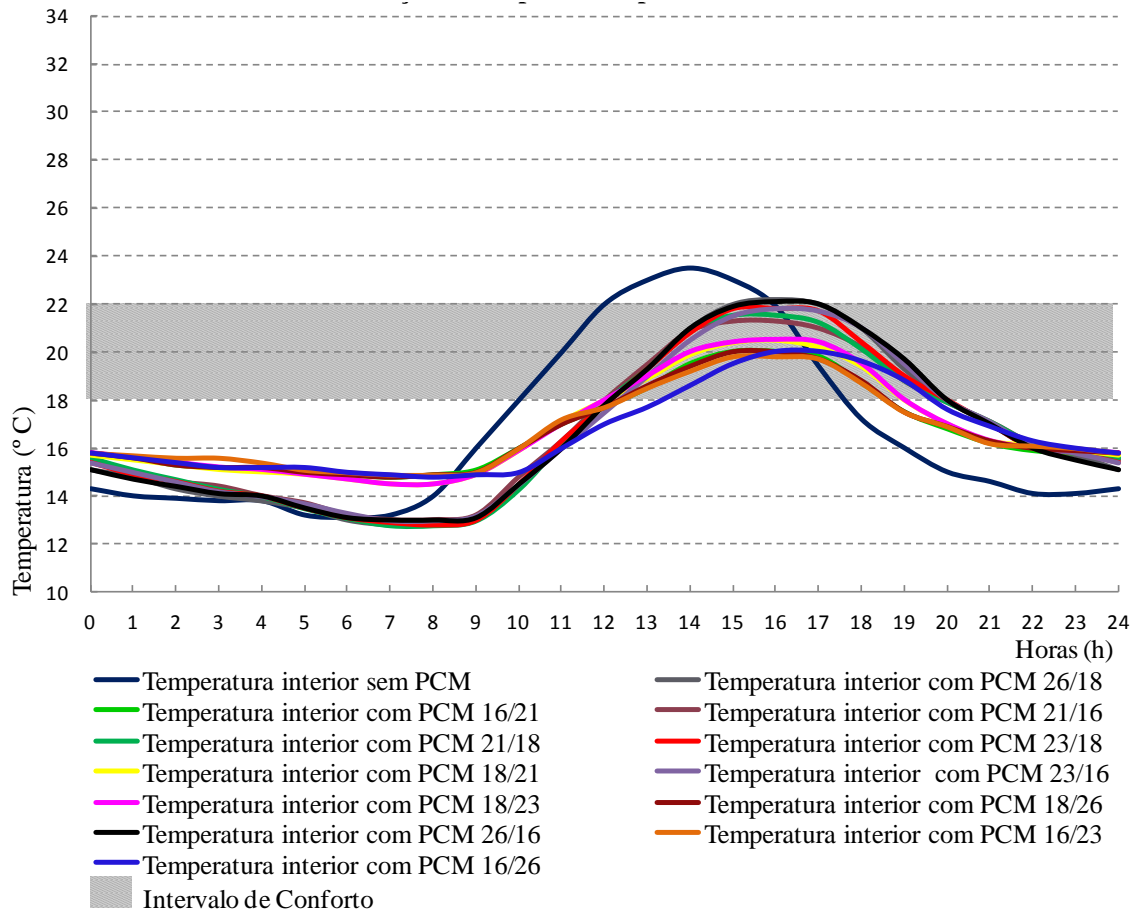


Figura 39: Distribuição de temperaturas para o dia mais frio com as diferentes combinações de utilização de PCMs

Os gráficos das Figuras 38 e 39 evidenciam que a combinação mais eficiente reside na aplicação do PCM 16 nas paredes e o PCM 26 no teto. Se tivermos em conta o dia mais quente do ano, esta é a opção mais próxima do intervalo de conforto e com maior valor de amortecimento relativamente à evolução de temperatura da solução existente.

Por sua vez, ao considerarmos o dia mais frio do ano, verificamos que a evolução de temperaturas interiores com PCM16/26 é a que apresenta menor amplitude ( $\Delta$ ), e maior gradiente térmico, no intervalo horário das 0h-10h e das 17h as 24h, conforme ilustra a Figura 41.

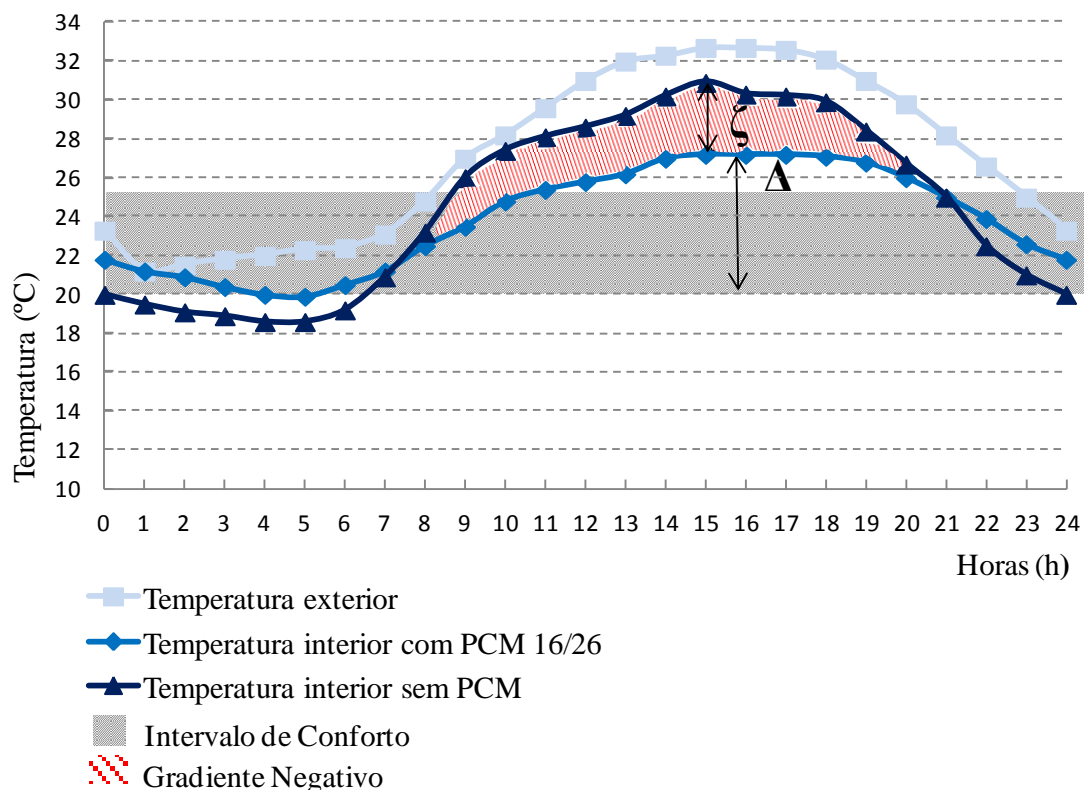


Figura 40: Evolução das temperaturas interiores e exteriores, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 16/26

Os resultados obtidos nesta simulação são semelhantes aos da primeira análise. Com esta aplicação, consegue-se obter uma evolução de temperaturas com menor amplitude térmica ( $\Delta$ ), aproximadamente 7°C, e um amortecimento ( $\zeta$ ) na ordem dos 3°C, como revela a Figura 40.

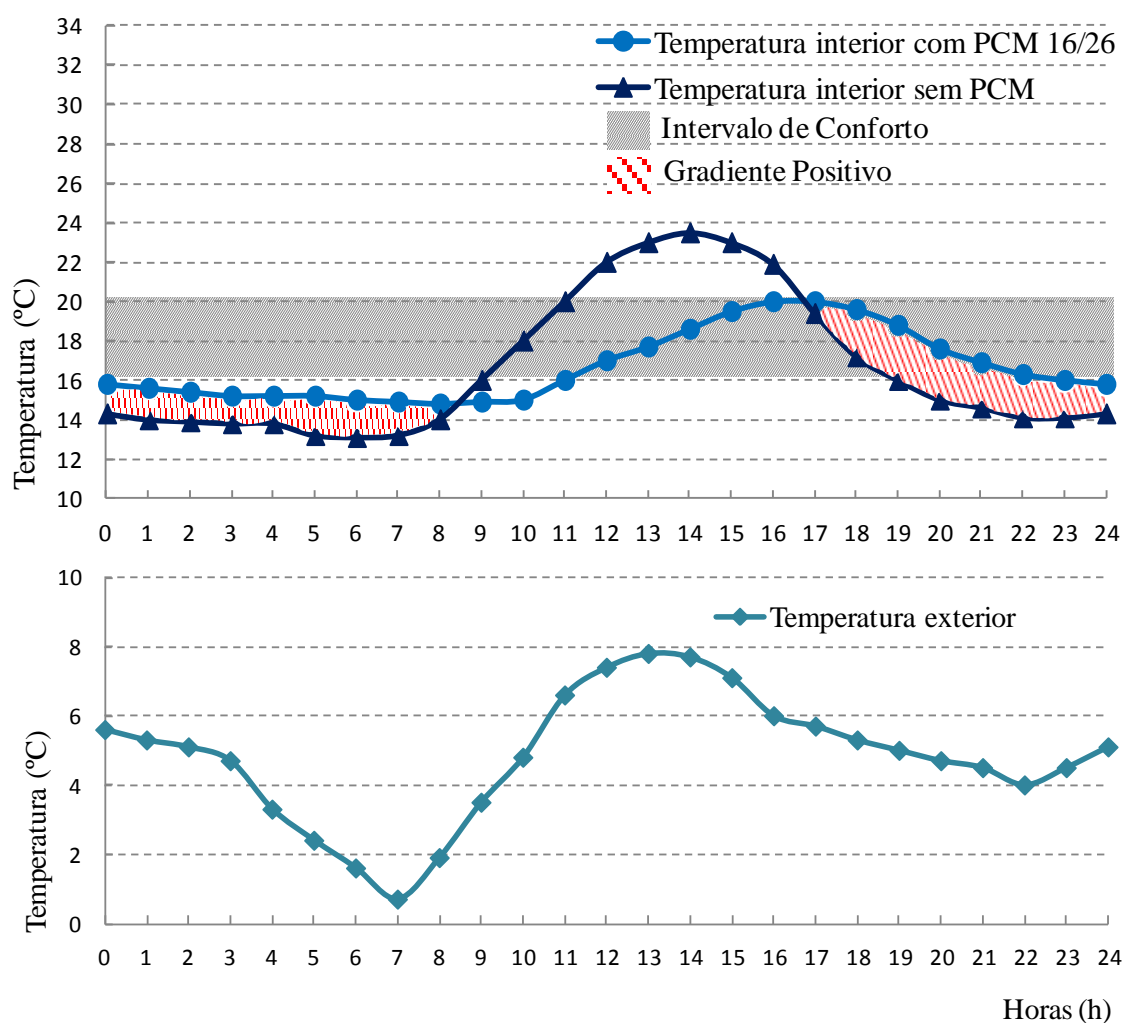


Figura 41: Evolução das temperaturas interiores e exteriores, durante o período mais frio com a aplicação de PCM 16/26

A partir dos resultados apresentados na Figura 41 é possível verificar um desfasamento entre as duas evoluções de temperaturas de cerca de 3 horas, o que se traduz na permanência da resposta da solução com PCM no intervalo de conforto durante um período maior de tempo. Com a solução existente as temperaturas interiores mantinham-se dentro do intervalo de conforto até às 17 horas. Com a aplicação de PCMs, é possível obter temperaturas interiores dentro do intervalo de conforto até às 20 horas.

No percurso de descarga do PCM, verifica-se um aumento de temperatura de, 3 °C no final da tarde e de 2°C no período noturno.

Em suma, os resultados da solução de compromisso revelaram-se bastante positivos, uma vez que se conseguiu provar que é possível conjugar as duas soluções e que cada um dos PCMs funciona, separadamente, para funções distintas.

Os resultados apresentados são positivos no âmbito da análise de um edifício de serviços, em que se pretende alcançar temperaturas de conforto durante o seu período de utilização.

#### **7.4. Avaliação da contribuição térmica de uma parede de trombe com recurso ao programa *SLR\_P***

Com recurso ao programa *SLR\_P* é possível estimar os ganhos solares na estação de aquecimento alcançados pela introdução de uma parede de trombe. Pretende-se inicialmente, analisar a influência, de diversos componentes da parede de trombe, como: a espessura da parede de armazenamento; o tipo de material utilizado na caixilharia; o tipo de vidro, e a área da parede de armazenamento. Pretende-se encontrar a combinação ideal de fatores que sustente a introdução de uma parede com o maior ganho solar possível. Para esta análise inicial define-se uma edificação com as características indicadas no ponto 7.4.1. relativamente à qual se procedeu à avaliação dos ganhos solares obtidos com a aplicação da parede de trombe. Efetuou-se também a análise da variação dos ganhos obtidos pela parede quando se alteram algumas das características construtivas.

Depois de encontrada a configuração da parede de trombe mais eficiente, é analisada uma sala do departamento de Engenharia Civil com e sem parede de trombe, de forma a verificar a fração de ganho solar com a aplicação desta estratégia passiva.

O programa *SLR\_P* contém na base de dados informações sobre duas localidades de Aveiro: Anadia e São Jacinto. Uma vez que o Departamento de Engenharia Civil se encontra localizado no Campus de Santiago, no interior de Aveiro, a escolha recai sobre a localidade de Anadia, com características mais aproximadas, em detrimento da localidade de São Jacinto, um ambiente tipicamente marítimo. Os dados climáticos utilizados pelo programa no cálculo térmico do edifício constam na Tabela 7.

Tabela 7: Dados climáticos do *software SLR\_P*

	GD <sub>15</sub> (°C)	GD <sub>18</sub> (°C)	RH (Wh/m <sup>2</sup> )	RV <sub>S</sub> (Wh/m <sup>2</sup> )	RV <sub>SE</sub> (Wh/m <sup>2</sup> )	RV <sub>SO</sub> (Wh/m <sup>2</sup> )	RV <sub>E</sub> (Wh/m <sup>2</sup> )	RV <sub>O</sub> (Wh/m <sup>2</sup> )	T <sub>Solo</sub> (°Cx10))
Outubro	52	101	3332	3949	3345	3345	2282	2282	156
Novembro	109	180	2265	3844	2990	2990	1668	1668	106
Dezembro	157	243	1744	3610	2723	2723	1346	1346	80
Janeiro	187	276	1910	3506	2689	2689	1425	1425	78
Fevereiro	140	218	2761	3674	3005	3005	1920	1920	80
Março	133	212	3752	3356	3099	3099	2427	2427	111
Abril	83	144	5042	3060	3337	3337	3117	3117	134
Maior	63	122	5798	2778	3265	3265	3467	3467	176

#### 7.4.1. Edifício Modelo

As características da edificação definida para a análise dos ganhos solares, utilizando o *software SLR\_P*, foram estabelecidos tendo por base os valores de referência do RCCTE [31], isto relativamente aos valores do  $U_{\text{referência}}$  de transmissão térmica da envolvente opaca, do vão envidraçado e do fator solar dos vãos envidraçados. No que diz respeito à área útil estabeleceu-se um valor de 100 m<sup>2</sup> considerando um valor médio para um pavimento de uma fração habitacional.

Apresentam-se de seguida os valores utilizados no cálculo:

- Área de envidraçado = 15% da área pavimento, orientados a oeste;
- Inércia térmica média;
- Ganhos internos = 4 W/m<sup>2</sup>;
- Fator Solar = 0,25 ( $V_1, N_1$ );
- Valores de U de referência:
  - U parede = 0,7 W/m<sup>2</sup>.°C;
  - U pavimento = 1 W/m<sup>2</sup>.°C;
  - U cobertura = 0,5 W/m<sup>2</sup>.°C;
  - U vidro = 4,3 W/m<sup>2</sup>.°C;
- Área útil de 100m<sup>2</sup>.

#### **7.4.1.1. Calculo Térmico do Edifício Modelo**

##### **Edifício modelo sem parede de trombe**

Neste subcapítulo pretende-se a otimização deste sistema, que passa pela análise da influência de fatores como a espessura, o tipo de caixilharia e o tipo de vidro, na eficiência de uma parede de trombe. Procura-se também avaliar qual a percentagem de ganho térmico que a inclusão de uma parede de trombe permite obter na sala em análise.

##### *Dados gerais*

O programa *SLR\_P* desenvolve-se a partir de um menu que permite a introdução da informação geral do caso em estudo, designadamente a introdução de informações como sejam a localização do edifício, o seu pé direito, a área de pavimento e o número de renovações horárias (com a hipótese de ser variável). Por último escolhe-se o tipo de construção predominante.

Localização: Anadia

Pé direito médio: 2,8 m

Área total de pavimento: 100 m<sup>2</sup>

Número de renovações horárias: 1 renovação/h

Tipo de construção predominante: Tijolo

Após a introdução dos dados gerais, dá-se início à descrição do edifício em pormenor, compreendendo numa primeira fase o preenchimento de um quadro subordinado à envolvente, às paredes, às coberturas e aos pavimentos.

##### *Descrição da envolvente*

Para cada orientação define-se a envolvente opaca, os envidraçados e os sistemas de ganho indireto (caso exista).

Para cada tipo de parede do edifício, procede-se à sua descrição, referindo a sua posição relativa (em contacto com o exterior, interior, ou solo).

De seguida indica-se a sua orientação, a área útil e o tipo de parede (em termos construtivos). O programa dispõe de um menu com os tipos construtivos mais utilizados

na construção Portuguesa e inscritos na documentação técnica do LNEC (ITE 28). Não obstante, o programa permite introduzir o valor que se entende na opção “outro tipo de parede”, procedimento este último adotado dada a intenção de estudar neste subcapítulo o edifício modelo tendo por base os valores de coeficiente de transmissão térmica de referência do RCCTE ( $U_{\text{parede}} = 0,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ).

Esta última opção obriga ainda à introdução do fator de concentração de perdas, entendido como o quociente entre o valor médio pesado do coeficiente de transmissão térmica de uma zona da envolvente e o coeficiente de transmissão térmica da sua zona corrente. Este fator permite assim quantificar a influência das heterogeneidades (pilares, vigas, caixas de estore) nas perdas térmicas da zona da envolvente [93]. O regulamento atualmente em vigor não prevê a aplicação do fator de concentração de perdas, uma vez que estas são contabilizadas individualmente. Da multiplicação destes dois fatores resulta o valor designado por “tipo de envolvente”.

Terminada a caracterização da envolvente opaca, segue-se a descrição da envolvente não opaca, introduzindo-se a área de envidraçado e o tipo de envidraçado. Também neste campo o utilizador tem liberdade para referir o coeficiente de transmissão térmica que entender ou pode optar por uma das diversas soluções possíveis apresentada na base de dados do programa. Neste estudo, optou-se por introduzir o coeficiente.

Por último define-se o sistema de ganho indireto (se existente), introduzindo a área e a espessura da parede de armazenamento, o tipo de vidro existente e o tipo de caixilharia.

Apresenta-se na Tabela 8 a caracterização da envolvente vertical do edifício considerado para o efeito deste cálculo.

Tabela 8: Descrição da envolvente: edifício modelo

Parede				Envidraçado		Ganho Indireto	
Posição	Orientação	Área ( $\text{m}^2$ )	Tipo	Área ( $\text{m}^2$ )	Tipo	Área ( $\text{m}^2$ )	Tipo
Exterior	Norte	28,0	0,84	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Oeste	23,8	0,84	4,2	3,0	0,0	0,0
Exterior	Sul	28,0	0,84	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Este	28,0	0,84	0,0	0,0	0,0	0,0

### Descrição da Cobertura

Para procedermos à caracterização da cobertura segue-se um procedimento análogo ao seguido nas paredes, anteriormente descrito. Primeiro indica-se qual é o tipo de cobertura (horizontal em terraço, inclinada sem desvão ventilado ou inclinada com desvão ventilado). Posteriormente introduz-se a área, define-se a tipologia construtiva da cobertura (segundo as soluções mais comuns vigentes em Portugal) e opta-se, ou não, por se introduzir o valor do coeficiente de transmissão térmica. De forma semelhante ao que se fez anteriormente, também aqui se introduziu o valor de referência do RCCTE (Tabela 9). Existe ainda a possibilidade de caracterizar o envidraçado existente na cobertura, o que não se verifica no caso particular em estudo.

Tabela 9: Descrição da cobertura: edifício modelo

Cobertura			Envidraçado	
Posição	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Inclinada	14,14	0,5	0,0	0,0

### Descrição do pavimento

A caracterização dos pavimentos é em tudo análoga à das paredes e coberturas, considerando-se suficientemente explícita a sua descrição na tabela seguinte.

Tabela 10: Descrição do pavimento: edifício modelo

Posição	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Em contato com o solo	100	1,0

### Balanço térmico

Uma vez terminada a descrição do edifício, o programa inicia o processo do cálculo térmico, não sem antes indicarmos a temperatura de referência, em função da qual serão calculadas as necessidades de aquecimento.

O primeiro quadro de resultados consiste na sintetização da informação geral mais importante para o estudo, ao que acresce a identificação do valor do coeficiente global de perdas com e sem infiltrações.

- Localização: Anadia;
- Tipo de edifício: Construção em alvenaria de tijolo;



- Temperatura de referência: 18°C;
- Área de pavimento: 100 m<sup>2</sup>;
- Volume: 280 m<sup>3</sup>;
- Coeficiente global de perdas (com infiltrações): 305,42 W/°C;
- Coeficiente global de perdas (sem infiltrações): 210,22 W/°C.

O segundo quadro de resultados apresenta o balanço energético do edifício em função das perdas assinaladas. Apresenta-se, em termos percentuais, a ordem de importância dos vários elementos da envolvente, Figura 42.

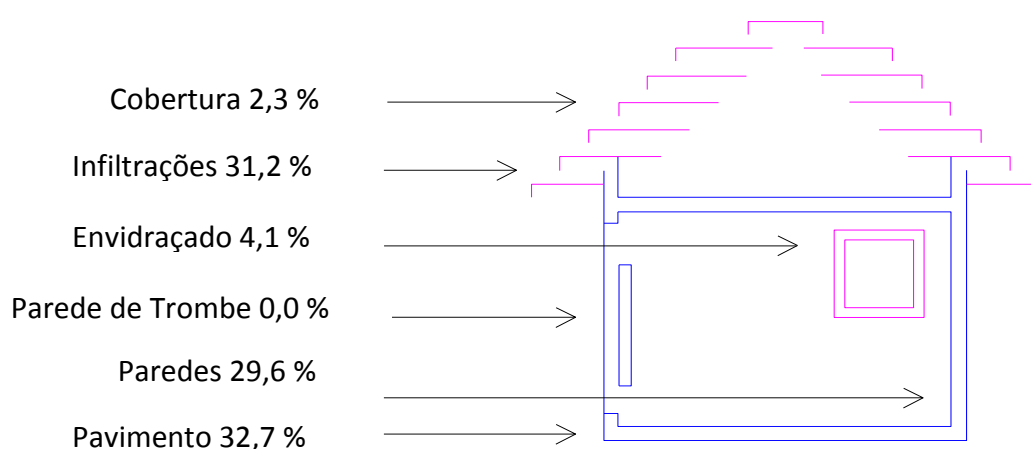


Figura 42: Balanço de perdas do edifício modelo

Por último apresenta-se o quadro com o cálculo dos diversos valores necessários para definir as necessidades de aquecimento do edifício em estudo (Tabela 11).

Tabela 11: Contabilização da fração de ganho solar do edifício modelo

Mês	$Q_{ref.}$ (kW.h)	$Q_{sol}$ (kW.h)	SLR	FS (%)	$Q_{aux.}$ (kW.h)
Outubro	676,5	202,0	0,299	22,4	524,9
Novembro	1 420,2	149,2	0,105	8,1	1 304,6
Dezembro	1 942,0	125,3	0,065	5,2	1 841,9
Janeiro	2 119,6	131,7	0,062	5,0	2 014,0
Fevereiro	1 746,8	153,5	0,088	6,9	1 626,6
Março	1 558,5	199,1	0,128	9,8	1 405,6
Abril	1 041,1	210,1	0,202	15,3	882,1
Maio	631,2	212,2	0,336	25,2	472,3
$\Sigma$	11 136,0	1 383,2		12,2	10 072,1

Desta simulação resulta um valor de fração solar muito baixo (12,2 %), o que atesta que a tipologia deste edifício não é a mais favorável para a obtenção de ganhos

solares. Sem surpresa, esta edificação apresenta um elevado valor de necessidades de aquecimento (10 072,1 (Kw.h)), por forma a compensar a diferença entre as perdas térmicas e os ganhos solares.

### Edifício modelo com parede de trombe

Com o intuito de demonstrar as potencialidades da aplicação da parede de trombe, introduziu-se no edifício modelo esta estratégia passiva na fachada sul, ocupando a parede de trombe uma área de 50% da área da parede existente, projetada com 20 cm de espessura, com vidro duplo e caixilharia metálica. Para o efeito, introduziram-se no sistema os dados relativos a esta solução (Tabela 12).

Tabela 12: Descrição da envolvente: parede de trombe de 20 cm

Parede				Envidraçado		Ganho Indireto	
Posição	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Exterior	Norte	28,0	0,84	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Oeste	23,8	0,84	4,2	3,0	0,0	0,0
Exterior	Sul	28,0	0,84	0,0	0,0	14,0	1,4
Exterior	Este	28,0	0,84	0,0	0,0	0,0	0,0

Coefficiente global de perdas (com infiltrações): 324,88 W/°C

Coefficiente global de perdas (sem infiltrações): 229,68 W/°C

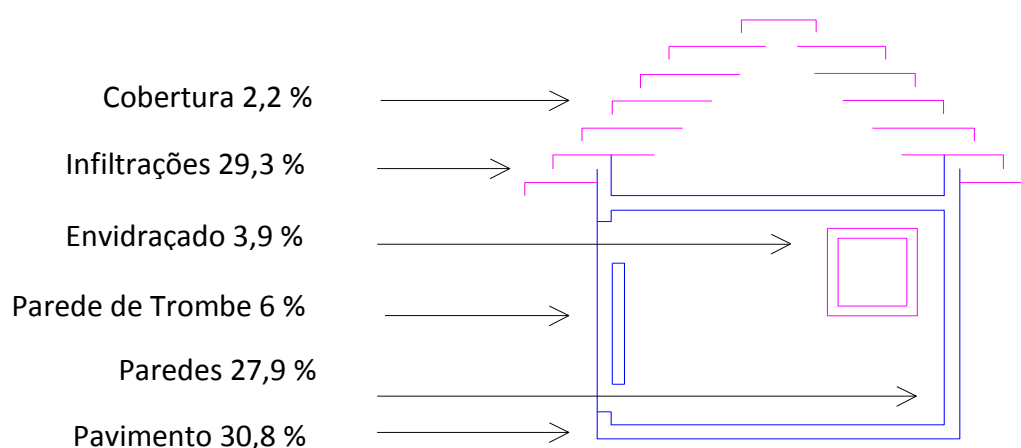


Figura 43: Balanço de perdas: parede de trombe de 20 cm

Tabela 13: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe de 20 cm

Mês	$Q_{ref.} \text{ (kW.h)}$	$Q_{sol} \text{ (kW.h)}$	SLR	FS (%)	$Q_{aux.} \text{ (kW.h)}$
Outubro	723,7	1 401,7	1,937	75,6	176,2
Novembro	1 504,3	1 327,8	0,883	47,2	794,1
Dezembro	2 055,5	1 276,9	0,621	35,6	1 323,3
Janeiro	2 248,5	1 242,5	0,553	32,0	1 529,8
Fevereiro	1 848,6	1 161,7	0,628	36,0	1 183
Março	1 657,6	1 138,5	0,687	39,1	1 009,5
Abril	1 108,4	917,0	0,827	45,0	609,6
Mai	688,2	790,9	1,149	56,6	298,6
$\Sigma$	11 834,7	9 256,9		45,9	6 924,3

Ao comparar os valores de fração solar do edifício modelo com e sem a parede de trombe, verifica-se um aumento substancial dos ganhos térmicos no edifício com parede de trombe. Com a introdução da parede trombe consegue-se um aumento da fração solar de 33,7%, o que se traduz num valor de necessidades térmicas muito inferior. Diminuem-se assim as necessidades energéticas deste edifício.

Os pontos seguintes são dedicados à realização de estudos paramétricos aplicados para compreender o efeito de alguns aspetos construtivos da parede de trombe.

#### 7.4.2. Análise da influência da espessura da parede de armazenamento no ganho térmico da parede de trombe

Através deste exercício pretende-se analisar a influência da espessura da parede na sua eficiência. Mantêm-se todas as premissas e características da simulação anterior, variando-se apenas a espessura da parede. Testa-se agora a utilização de uma parede de trombe na fachada sul, ocupando os mesmos 50% da área, mas com 10 cm de espessura, caixilharia de metal e vidro duplo (Tabela 14).

Tabela 14: Descrição da envolvente: parede de trombe de 10 cm

Parede				Envidraçado		Ganho Indireto	
Posição	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Exterior	Norte	28,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Oeste	23,8	0,8	4,02	3,0	0,0	0,0
Exterior	Sul	28,0	0,8	0,0	0,0	14,0	1,51
Exterior	Este	28,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0

Coeficiente global de perdas (com infiltrações): 326,56 W/°C

Coeficiente global de perdas (sem infiltrações): 231,36 W/°C

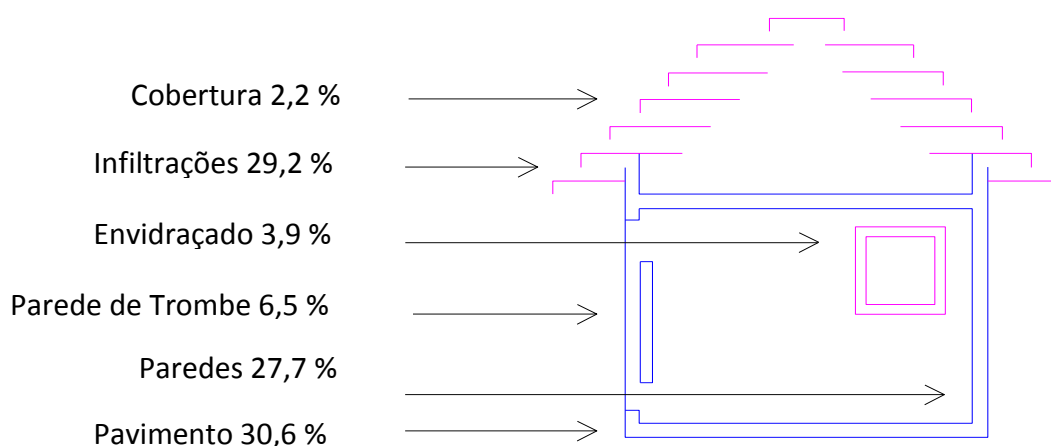


Figura 44: Balanço de perdas: parede de trombe de 10 cm

Tabela 15: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe de 10 cm

Mês	$Q_{ref.}$ (kW.h)	$Q_{sol}$ (kW.h)	SLR	FS (%)	$Q_{aux.}$ (Kw.h)
Outubro	727,7	1401,7	1,926	75,9	175,2
Novembro	1511,5	1327,8	0,878	47,5	793,3
Dezembro	2065,3	1276,9	0,618	36,3	1315,8
Janeiro	2259,6	1242,5	0,550	33	1514,9
Fevereiro	1857,4	1161,7	0,625	36,6	1177,0
Março	1666,1	1138,5	0,683	39,3	1011,2
Abril	1114,2	917	0,823	45,3	609,4
Maio	693,1	790,9	1,141	56,9	299,1
	11895,0	9256,9		46,3	6895,9

Como se pode verificar na Tabela 15, a alteração da espessura da parede resulta diretamente na alteração do valor de  $Q_{ref.}$  indicador que regista um ligeiro aumento. Paredes de armazenamento de menor espessura registam um aumento das perdas. Por estas duas simulações é possível verificar que é mais eficiente uma parede de trombe com espessura de 10 cm do que com 20 cm, uma vez que para as mesmas características obtiveram-se valores de FS de 46,3% e 45,9%, respetivamente. A diferença entre os valores apresentados é pouco significativa, muito embora se conclua que a aplicação de uma parede de trombe com 10 cm de espessura é a mais coerente uma vez que potencializa mais a capacidade inercial da parede.

### 7.4.3. Análise da influência do material de caixilharia no ganho térmico da parede de trombe

Pretende-se, através desta experiência, simular a influência do material utilizado na caixilharia. Desta forma analisa-se a utilização de uma parede de trombe na fachada sul, ocupando os mesmos 50% de área, mas com 10 cm de espessura, caixilharia de madeira e vidro duplo (Tabela 16).

Tabela 16: Descrição da envolvente: parede de trombe com caixilharia de madeira

Parede				Envidraçado		Ganho Indireto	
Posição	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Exterior	Norte	28,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Oeste	23,8	0,8	4,2	3,0	0,0	0,0
Exterior	Sul	28,0	0,8	0,0	0,0	14,0	1,4
Exterior	Este	28,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0

Coeficiente global de perdas (com infiltrações): 325,02 W/°C

Coeficiente global de perdas (sem infiltrações): 229,82 W/°C

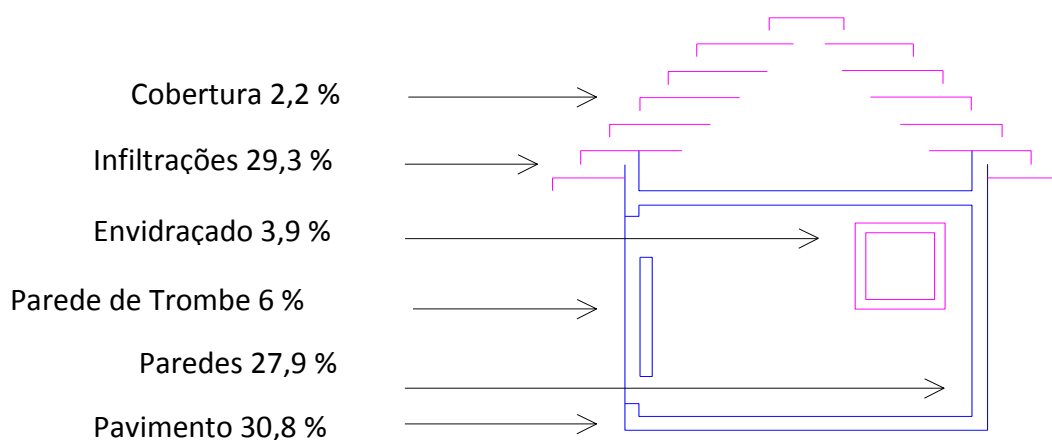


Figura 45: Balanço de perdas: parede de trombe com caixilharia de madeira

Tabela 17: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe com caixilharia de madeira

Mês	Q <sub>ref.</sub> (kW.h)	Q <sub>sol.</sub> (kW.h)	SLR	FS (%)	Q <sub>aux.</sub> (kW.h)
Outubro	724,0	1 401,7	1,936	76,1	173,0
Novembro	1 504,9	1 327,8	0,882	47,7	787,5
Dezembro	2 056,3	1 276,9	0,621	36,4	1 307,5
Janeiro	2 249,3	1 242,5	0,552	33,1	1 505,3
Fevereiro	1 849,3	1 161,7	0,628	36,8	1 169,5
Março	1 658,3	1 138,5	0,687	39,5	1 004,0
Abril	1 108,9	917,0	0,827	45,5	604,7
Maior	688,6	790,9	1,148	57,1	295,4
Σ	11 839,7	9 256,9		46,5	6 846,8

Com a alteração do material de caixilharia, de metal para madeira, assiste-se a uma diminuição da carga térmica dado que a madeira permite menos perdas térmicas. Verifica-se ainda uma leve diferença nos valores de FS. A caixilharia de madeira, com um valor de FS de 46,5 %, é mais eficiente do que a caixilharia metálica (FS de 46,3%).

Conclui-se que a alteração de caixilharia não tem um efeito determinante. Ela deve ser equacionada como mais um fator a considerar na procura da solução otimizada.

#### 7.4.4. Análise da influência do tipo de vidro no ganho térmico da parede de trombe

Por último pretende-se analisar a influência do tipo de vidro, simples ou duplo na parede de trombe. Analisa-se a utilização de uma parede de trombe na fachada sul, ocupando os mesmos 50% de área, mas agora com 10 cm de espessura, caixilharia de madeira e vidro simples (Tabela 18).

Tabela 18: Descrição da envolvente: parede de trombe com vidro simples

Parede				Envidraçado		Ganho Indireto	
Posição	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Exterior	Norte	28,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Oeste	23,8	0,8	4,2	3,0	0,0	0,0
Exterior	Sul	28,0	0,8	0,0	0,0	14,0	1,63
Exterior	Este	28,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0

Coeficiente global de perdas (com infiltrações): 328,24 W/°C

Coeficiente global de perdas (sem infiltrações): 233,04 W/°C

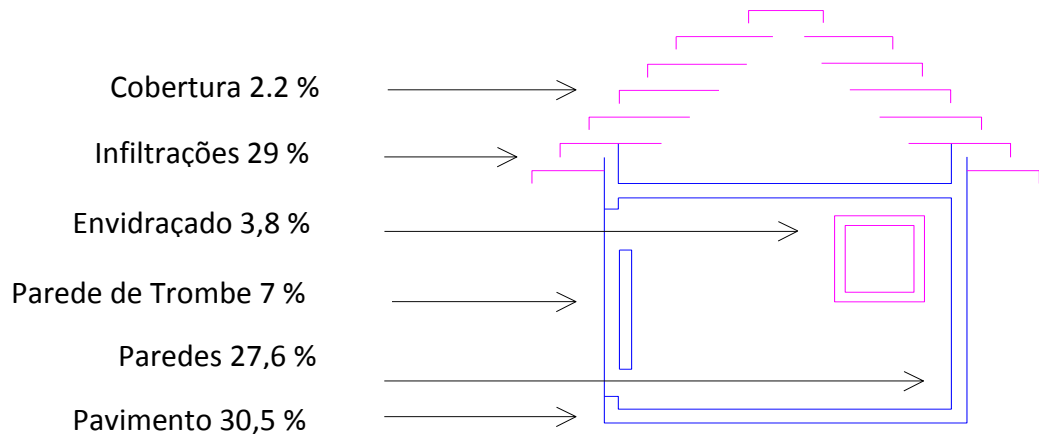


Figura 46: Balanço de perdas: parede de trombe com vidro simples

Tabela 19: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe com vidro simples

Mês	$Q_{ref.}$ (Kw.h)	$Q_{sol}$ (kW.h)	SLR	FS (%)	$Q_{aux.}$ (kW.h)
Outubro	731,8	1.556,0	2,126	70,0	219,9
Novembro	1 518,8	1 473,1	0,970	42,3	876,6
Dezembro	2 075,1	1 417,9	0,683	32,1	1 409,9
Janeiro	2 270,8	1 379,4	0,607	28,7	1 619,3
Fevereiro	1 866,2	1 291,3	0,692	32,5	1 260,2
Março	1 674,7	1 284,2	0,767	35,4	1 083,0
Abril	1 120,0	1 058,3	0,945	41,8	652,1
Maio	698,1	935,6	1,340	53,7	323,0
$\Sigma$	11 955,4	10 395,8		42,0	7 444,0

Pela análise da Tabela 19, constata-se que a alteração do tipo de vidro tem repercussões no valor da carga térmica e da energia solar absorvida. Estes indicadores aumentam como resultado da aplicação do vidro simples, material que resulta em maiores perdas e maiores ganhos solares.

Relativamente à fração solar, esta sofre uma quebra de 4,5 %, o que permite concluir que o vidro duplo é muito mais eficiente do que o vidro simples.

Com estas primeiras quatro simulações, é possível encontrar uma solução otimizada, constituída por uma parede com espessura de 10 cm, caixilharia de madeira e vidro duplo.

#### 7.4.5. Análise da área da parede de armazenamento no ganho térmico da parede de trombe

Na simulação seguinte analisa-se a utilização de uma parede de trombe na fachada sul, ocupando 100% da área, com 10 cm de espessura, caixilharia de madeira e vidro duplo (Tabela 20).

Tabela 20: Descrição da envolvente: parede de trombe ocupando 100% da fachada

Parede				Envidraçado		Ganho Indireto	
Posição	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Exterior	Norte	28,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Oeste	23,8	0,8	4,2	3,0	0,0	0,0
Exterior	Sul	28,0	0,8	0,0	0,0	28,0	1,4
Exterior	Este	28,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0

Coefficiente global de perdas (com infiltrações): 344,62 W/°C

Coefficiente global de perdas (sem infiltrações): 249,42 W/°C

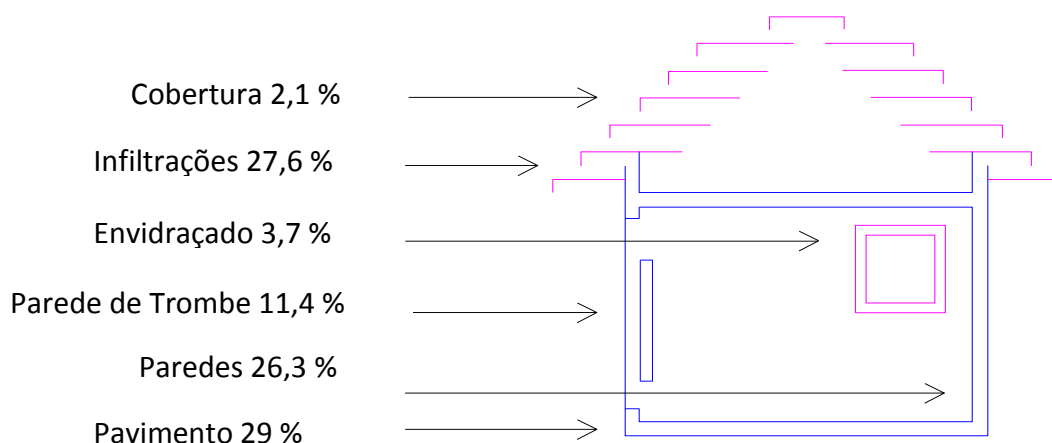


Figura 47: Balanço de perdas: parede de trombe ocupando 100% da fachada

Tabela 21: Contabilização da fração de ganho solar: parede de trombe ocupando 100% da fachada

Mês	Q <sub>ref.</sub> (kW.h)	Q <sub>sol</sub> (kW.h)	SLR	FS (%)	Q <sub>aux.</sub> (kW.h)
Outubro	771,5	2601,5	3,372	91,3	66,9
Novembro	1 589,6	2 506,4	1,577	68,0	509,5
Dezembro	2 170,6	2 428,4	1,119	55,3	971,1
Janeiro	2 379,3	2 353,3	0,989	50,8	1 169,7
Fevereiro	1 951,9	2 169,8	1,112	55,0	877,7
Março	1 758,0	2 078,0	1,182	57,3	751,0
Abril	1 176,6	1 623,8	1,380	63,0	435,1
Maió	746,0	1 369,6	1,836	73,5	197,7
Σ	12 543,5	17 130,7		64,3	4 978,6



Constata-se, através da Tabela 21, que o aumento da área da parede resulta no aumento das perdas térmicas, compensado pelo aumento da energia solar absorvida, e num elevado aumento da percentagem da fração solar de 17,8 %. Conclui-se assim que o aumento da área de parede de armazenamento tem um efeito positivo.

#### 7.4.6. Análise da sala de estudo com parede de trombe

No capítulo anterior analisámos a influência da utilização de soluções com incorporação de PCMs na resolução de problemas de sobreaquecimento na estação quente. No presente capítulo, pretende-se demonstrar a eficácia de uma possível solução com incorporação de PCMs de aquecimento para a estação fria.

Esta solução assenta sobre a aplicação de uma parede de trombe na parede orientada a sul da sala em estudo. À semelhança do que foi feito na simulação do edifício modelo, também nesta simulação não se recorreu às tipologias apresentadas pelo software. Procedeu-se ao cálculo dos coeficientes de transmissão térmica das paredes, do pavimento e do teto da sala, introduzido estes valores no programa (Tabela 22), encontrando assim um valor mais próximo da configuração existente.

Tabela 22: Coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos

	<b>Materiais</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Resistência térmica [(m<sup>2</sup>.°C)/W]</b>	<b>Condutibilidade térmica (W/(m<sup>2</sup>.°C))</b>	<b>Coeficiente de transmissão térmica (W/°C)</b>
<b>Parede exterior</b>	Tijolo 11 maciço	0,11	0,13		0,531
	Caixa de ar	0,11	0,18		
	Placa de EPS	0,04		0,042	
	Alvenaria de tijolo de 15	0,15	0,39		
<b>Parede interior</b>	Placa de gesso cartonado	0,015		0,25	0,469
	Lã mineral	0,07		0,04	
	Placa de gesso cartonado	0,015		0,25	
<b>Pavimento</b>	Vinílico	0,003		0,17	1,73
	Betonilha	0,04		0,17	
	Laje alveolar	0,27	0,28		
<b>Teto</b>	Placa de gesso cartonado	0,015		0,25	0,64
	Lã mineral	0,05		0,04	

**Sala sem parede de trombe**

À semelhança do descrito na análise do edifício modelo, nesta simulação procedeu-se à introdução dos parâmetros com os mesmos procedimentos, permitindo a caracterização da envolvente (Tabela 23), da cobertura (Tabela 24) e do pavimento (Tabela 25).

Localização: Anadia

Pé direito médio: 3 m

Área total de pavimento: 84 m<sup>2</sup>

Número de renovações horárias: 1

Tipo de construção predominante: Tijolo

Tabela 23: Descrição da envolvente: sala em estudo

Parede				Envidraçado		Ganho Indireto	
Posição	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Exterior	Norte	21,0	0,56	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Oeste	36,0	0,56	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Sul	0,0	0,0	21,0	3,0	0,0	0,0
Exterior	Este	7,20	0,63	28,8	3,0	0,0	0,0

Tabela 24: Descrição da cobertura: sala em estudo

Cobertura			Envidraçado	
Posição	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Inclinada	84,0		0,64	0,0

Tabela 25: Descrição do pavimento: sala em estudo

Posição	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Sobre o solo	84,0	1,73

Localização: Anadia;

Tipo de edifício: Construção em alvenaria de tijolo,

Temperatura de referência: 18°C;

Área de pavimento: 84 m<sup>2</sup>;

Volume: 252 m<sup>3</sup>;

Coeficiente global de perdas (com infiltrações): 426,52 W/°C;

Coeficiente global de perdas (sem infiltrações): 340,84 W/°C.

Tabela 26: Balanço de perdas: sala em estudo

Porcentagem de perdas (%)					
Cobertura	Infiltrações	Envidraçado	Parede trombe	Paredes	Pavimento
12,6	20,1	35,0	0,0	6,7	25,6

Tabela 27: Contabilização da fração de ganho solar: sala em estudo

Mês	Q <sub>ref.</sub> (kW.h)	Q <sub>sol</sub> (kW.h)	SLR	FS (%)	Q <sub>aux.</sub> (kW.h)
Outubro	1 033,9	3 185,0	3,081	93,5	67,0
Novembro	1 842,5	2 791,1	1,515	73,8	482,1
Dezembro	2 487,4	2 586,6	1,040	60,1	993,7
Janeiro	2 825,2	2 569,4	0,909	55,1	1 267,7
Fevereiro	2 231,5	2 565,1	1,149	63,8	808,5
Março	2 170,1	2 774,3	1,278	67,7	701,0
Abril	1 474,0	2 501,1	1,697	77,8	328,0
Maio	1 248,8	2 322,9	1,860	80,8	240,2
Σ	15 313,6	21 295,3		71,6	4 888,3

Dos resultados da simulação da sala de estudo apresentados na Tabela 27, é de realçar um elevado valor de ganhos solares. No entanto, este ganho é acompanhado por valores elevados de perdas térmicas e necessidades de aquecimento, consequências indesejáveis mas espectáveis tendo em conta a tipologia da construção existente com elevadas áreas de envidraçado.

### Sala com parede de trombe

Considerando as conclusões suprarreferidas sobre os parâmetros que maior influência têm na eficiência da parede de trombe, analisa-se de seguida a implementação de uma parede de trombe ocupando toda a área da envolvente exterior orientada a Sul, com 10 cm de espessura, caixilharia de madeira e vidro duplo (Tabela 28).

Tabela 28: Descrição da envolvente: sala com parede de trombe

Parede				Envidraçado		Ganho Indireto	
Posição	Orientação	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo	Área (m <sup>2</sup> )	Tipo
Exterior	Norte	21,0	0,56	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Oeste	36,0	0,56	0,0	0,0	0,0	0,0
Exterior	Sul	0,0	0,0	21,0	3,0	21,0	1,4
Exterior	Este	7,20	0,63	28,8	3,0	0,0	0,0

Localização: Anadia;

Tipo de edifício: Construção em alvenaria de tijolo;

Temperatura de referência: 18°C;

Área de pavimento: 84 m<sup>2</sup>;

Volume: 252 m<sup>3</sup>;

Coeficiente global de perdas (com infiltrações): 455,92 W/°C;

Coeficiente global de perdas (sem infiltrações): 370,24 W/°C.

Tabela 29: Balanço de perdas: sala com parede de trombe

Percentagem de perdas (%)					
Cobertura	Infiltrações	Envidraçado	Parede trombe	Paredes	Pavimento
11,8	18,8	32,8	6,4	6,2	24,0

Tabela 30: Contabilização da fração de ganho solar: sala com parede de trombe

Mês	Q <sub>ref.</sub> (kW.h)	Q <sub>sol</sub> (kW.h)	SLR	FS (%)	Q <sub>aux.</sub> (kW.h)
Outubro	1 105,1	4 984,5	4,510	97,7	25,6
Novembro	1 969,6	4 558,9	2,315	85,5	286,3
Dezembro	2 658,9	4 313,9	1,622	74,1	690,0
Janeiro	3 020,0	4 235,6	1,403	68,8	942,1
Fevereiro	2 385,4	4 077,3	1,709	75,9	575,6
Março	2 319,7	4 183,4	1,803	77,7	517,3
Abril	1 575,6	3 561,4	2,260	84,8	239,7
Maio	1 334,9	3 190,9	2,390	86,4	182,1
Σ	16 369,2	33 106,0		81,3	3 458,7

A Tabela 30 testemunha que a introdução da parede de trombe nesta sala resulta no aumento das perdas térmicas e no aumento do valor da energia solar absorvida. A maior diferença verifica-se no valor da fração solar, com um aumento de 9,7%, o que se traduz numa elevada diminuição das necessidades de aquecimento. Crê-se, assim, alcançar o objetivo primordial deste trabalho, ao comprovarmos a diminuição da dependência energética do edifício.

É ainda de salientar que o aquecimento suplementar necessário mensal é calculado tendo como pressuposto a ocupação permanente do edifício, ou seja, a necessidade de atingirmos uma temperatura interior de 18°C durante as 24 horas do dia). Na realidade, porque se trata de uma universidade (edifício de ocupação não permanente), só é necessário manter a temperatura de 18°C durante o período de ocupação académica real, excluindo-se ainda os fins de semana, os dias feriados e as épocas de férias curriculares. Este último facto reforça a possibilidade de atingirmos pela solução apresentada uma redução muito considerável de Q<sub>aux</sub> mensal e, consequentemente, anual.

## **Capítulo 8**

---

Conclusões/Trabalhos Futuros



---

## 8. CONCLUSÕES

### 8.1. Principais conclusões

Este trabalho foi dedicado ao tema geral da “eficiência energética” e concretizado, essencialmente, em duas fases. Numa primeira fase, desenvolveu-se um estado de arte sobre esta temática e apresentaram-se possíveis estratégias passivas. Na segunda fase desenvolveu-se o estudo da aplicação dos PCMs e da parede de trombe na melhoria de espaços existentes, nomeadamente no caso de estudo.

As principais conclusões de cada análise realizada nesta dissertação serão apresentadas em secções separadas:

- Eficiência energética e construção bioclimática;
- Potencial uso de materiais mudança de fase;
- Caso de estudo.

#### 8.1.1. Estratégias passivas

A crescente necessidade de conforto, fruto de um novo contexto económico, político e social do nosso país, impulsionou um aumento contínuo do consumo energético das habitações. É primordial o recurso a técnicas que reduzam este consumo e que nos permitam beneficiar do mesmo nível de conforto, que utilizem os meios naturais em primeiro lugar e só após, no caso de persistirem carências, outras fontes de energia.

No âmbito da melhoria do desempenho energético dos edifícios, a transposição da *Energy Performance Building Directive* (EPBD) ocorreu de uma forma positiva, uma vez que todo o mercado português se conseguiu adaptar. Contudo, a metodologia de cálculo do RCCTE apresenta-se desadaptada quanto à implementação de medidas passivas, pelo que se supõe ser necessária uma formulação equitativa dos parâmetros de avaliação das soluções passivas e ativas.

O atual regulamento não fomenta a importância de orientar o principal investimento sobre as medidas passivas, mas antes estimula a instalação de sistemas energéticos ativos, garantindo uma classificação energética superior.

A melhoria da realidade atual do setor implicará uma mudança cultural ao nível de todos os intervenientes, desde as escolas, projetistas e construtores, passando pelos licenciadores e fiscalizadores, até aos utentes dos edifícios. Sendo assim, é importante que existam no ensino superior disciplinas que abordem estas temáticas de modo a incentivar a aplicação de técnicas solares passivas, desde a fase de conceção dos edifícios.

Com vista a desenvolver regras urbanísticas que conduzam à correta orientação dos edifícios, tanto do ponto de vista da incidência da radiação, como da predominância dos ventos, é necessário realizar uma análise aprofundada de soluções solares passivas que sejam de possível adaptação à realidade das tecnologias construtivas, utilizadas em Portugal. Nesta matéria, pode-se recorrer a *software* como o *CityCAD* que auxilia no planeamento e conceção do projeto uma vez que permite a análise integrada da envolvente do edifício, e o *Analysis Bio* que auxilia no processo de adequação de edificações ao clima local, utilizando arquivos climáticos anuais e horários. O *Analysis Bio* ainda permite a obtenção da solução otimizada do ponto de vista solar passivo, apresentando melhores resultados na utilização da inércia térmica assim como na massa de armazenamento, tanto para a estação de aquecimento como de arrefecimento.

Nas ferramentas de simulação dinâmica é importante a adaptabilidade da introdução de cargas latentes, sendo necessário a uniformização desta oferta formativa a nível das escolas.

Em suma esta temática encontra-se bem documentada, mas identificam-se algumas lacunas, tais como, a escassez de documentos técnicos que auxiliem os arquitetos e projetistas na escolha da solução construtiva mais adequada; um fraco incentivo à orientação dos edifícios no sentido de obterem os maiores benefícios possíveis da sua exposição solar através de elevados níveis de incidência da radiação.

### 8.1.2. Materiais mudança de fase

A seleção de um PCM para uma aplicação particular implica que haja correspondência entre a temperatura dos períodos de aquecimento/arrefecimento característicos do local e a temperatura de mudança de fase do PCM.

A melhoria do fenómeno de transferência de calor deve ser alvo de investimento e investigação pois, muitos sistemas apresentam ainda velocidades de transferência



inadequadas. A alteração da geometria dos painéis e a aplicação de materiais de encapsulamento com elevada condutibilidade térmica poderão ser a solução.

Constata-se ainda a necessidade do desenvolvimento de regulamentação que inclua a contribuição dos PCMs no alcance do conforto térmico de um edifício, uma vez que a regulamentação existente (RCCTE) contempla algumas estratégias passivas, mas não aborda a contabilização dos PCMs.

### 8.1.3. Caso de estudo

O estudo realizado centrou-se na análise da influência da aplicação de PCMs nas temperaturas interiores de um edifício. Esta análise foi possível através da simulação da aplicação de PCMs com temperaturas de fusão elevadas para a estação de arrefecimento e a aplicação de PCMs com temperaturas de fusão baixas para a estação de aquecimento.

Conclui-se que, com a incorporação de PCMs com temperatura de fusão de 26°C, na envolvente da sala, é possível alcançar um amortecimento das temperaturas interiores da ordem dos 4°C, impedindo o sobreaquecimento do ambiente interior na estação de aquecimento. Por outro lado, quando aplicado um PCM com temperatura de fusão de 16°C na envolvente, obtém-se um armazenamento de energia calorífica da ordem dos 3°C, sendo esta energia restituída ao interior no período noturno, permitindo assim uma menor oscilação da amplitude térmica, na estação de aquecimento.

Através da análise da solução de compromisso, conclui-se que é possível encontrar uma solução ótima de utilização das potencialidades de armazenamento da energia calorífica latente tanto para o inverno como para o verão. Conjugando um PCM com temperatura de fusão de 16°C nas paredes e um PCM com temperatura de fusão de 26°C no teto, consegue-se obter um armazenamento de energia calorífica da ordem dos 3°C no inverno e um amortecimento das temperaturas no verão da ordem dos 3 °C.

Concluindo, os PCMs com elevadas temperaturas de fusão são eficientes no amortecimento das temperaturas da estação de arrefecimento e os PCMs de baixas temperaturas de fusão são eficientes no armazenamento da energia calorífica na estação de aquecimento.

Da análise paramétrica realizada sobre a parede de trombe, conclui-se que a solução ótima desta técnica passa pela escolha correta dos materiais e dimensões dos

diversos elementos. A solução otimizada de uma parede de trombe é assim constituída por uma parede maciça de 10 cm de espessura, vidro duplo e caixilharia de madeira, ocupando a maior área possível na fachada orientada a sul.

Da aplicação desta técnica solar passiva na sala em análise, obteve-se um aumento da fração de ganho solar da ordem dos 9.7%, o que se traduz numa elevada diminuição das necessidades de aquecimento da ordem dos 1 429.6 kW.h.

#### **8.1.4. Conclusões finais**

Na atualidade os edifícios são excessivamente dependentes do fornecimento de energias provenientes de fontes não renováveis.

Perante esta realidade, a comunidade científica sentiu necessidade de adotar um novo conceito de edifícios, edifícios autossuficientes, nos quais toda a energia que necessitam é gerada pelo próprio edifício através de fontes renováveis.

O futuro da construção energeticamente eficiente passa assim, pela adoção do princípio dos edifícios de energia zero, nos quais os PCM farão parte integrante, tanto como sistemas passivos como ativos.

### **8.2. Perspetivas de trabalho futuro**

Os estudos realizados permitiram identificar e motivar diversas áreas de desenvolvimento futuro. Indicam-se, de seguida, vários trabalhos que interessa desenvolver.

Neste estudo sobre a temática dos PCMs apenas se fez a análise energética de uma sala, seria interessante em trabalhos futuros alargar o estudo à análise do comportamento térmico de um edifício.

Outra questão que merece desenvolvimento futuro é a avaliação do comportamento dos PCMs para todos os meses característicos do ano e para todas as zonas climáticas de Portugal, de forma a otimizar o PCM em termos de capacidade latente e temperatura de fusão para cada região.

Uma outra linha de desenvolvimento futuro passaria pelo desenvolvimento de programas de simulação dinâmica que permitissem a incorporação e simulação dos PCMs.

Relativamente à parede de trombe, seria interessante a realização de um estudo que encontrasse uma solução otimizada desta técnica solar passiva para cada uma das diferentes regiões climáticas do país, indicando os valores ótimos para as suas dimensões, que melhorem o desempenho do edifício no Inverno, sem comprometer o conforto no verão.

Perante os resultados positivos alcançados nesta dissertação através da introdução destes dois sistemas passivos, apresenta-se a sugestão de uma solução mista, a parede de trombe com PCMs. Solução sobre a qual é ainda necessário desenvolver estudos e aplicações experimentais, de modo a demonstrar o potencial existente nesta conjugação.



## **Referências Bibliográficas**

---



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Lanham, A., P. Gama, and R. Braz, *Arquitectura Bioclimática Perspectivas de inovação e futuro*. 2004.
- [2]. Ramos, A.T.V.F., *Análise de R.C.C.T.E. face á utilização se sistemas solares passivos em edifícios de habitação*, in *Departamento de Engenharia Civil Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra*. 2002, Universidade de Coimbra: Coimbra.
- [3]. Jardim, F.M.G., *Proposta de Intervenção de Reabilitação Energética de Edifícios de Habitação*, in *Escola de Engenharia*. 2009, Universidade do Minho.
- [4]. Zalba, B., et al., *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Applied Thermal Engineering, 2003. **23**(3): p. 251-283.
- [5]. *Eficiência Energética em Edifícios*. Disponível em <http://www.eficiencia-energetica.com/html/eee/eee.htm>. Acedido a [26 de Outubro de 2010].
- [6]. *Eficiência Energética*. Disponível em <http://www.eco.edp.pt/pt/particulares/conhecer/o-que-e-a-eficiencia-energetica/o-que-e-a-eficiencia-energetica>. Acedido a [ 25 de Outubro de 2010].
- [7]. Gonçalves, H., *Eficiência Energética: edifícios e áreas urbanas*. 2010.
- [8]. Camelo, S.M.L., et al., *The keep Cool II idea and strategy: from “cooling” to “sustainable summer comfort”*.
- [9]. Inverno, A. and A. Lamarão, *Caracterização Energética do País e do Algarve Uma Breve Abordagem*.
- [10]. Fonseca, D., *A casa de emissões nulas: estudo conceptual*. 2007.
- [11]. *Eficiência Energética nos Edifícios*. 2002, s.l.: Direcção Geral de Energia - Ministério da Economia.
- [12]. Marujo, R., T. Simões, and A. Estanqueiro, *Integration of renewable energy systems in buildings in the line of sustainable construction and energetic efficiency*.
- [13]. Torcellini, P., et al., *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition*. 2006.
- [14]. Silva, M.A.M.d., *Eficiência Energética de um Empreendimento multifamiliar*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2008, Universidade de Aveiro: Aveiro.
- [15]. *Transposição e Adaptação do Direito Comunitário*. Disponível em <http://www.dgsi.pt/gdep.nsf/7dd0d329b478bb198025690b0047cb6c/fdb95e2fcc372f58802576c40036e043?OpenDocument> Acedido a [ 10 de Novembro de 2010].

- [16]. Gonçalves, H.J.P., M.J.N.O. Panão, and S.M.L. Camelo, *Portuguese Thermal Building Legislation and Strategies for the Future*. 2010.
- [17]. *Directiva 2002/91/CE*, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L 1, 2002.
- [18]. *Directiva 2006/32/CE*, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L 114, 2006.
- [19]. Agência para a Energia. Disponível em <http://www.adene.pt/ADENE.Portal>. Acedido a [ 10 de Novembro de 2010].
- [20]. *Directiva 2010/31/UE*, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L 153, 2010.
- [21]. *A norma passivhaus em climas quentes da europa: directrizes de projecto para casa confortáveis de baixo consumo energético*, 2007.
- [22]. Abreu, M.I. and J. Lopes, *Energetic Rehabilitation in Buildings: Cost-Effective Solutions to Minimise Thermal Bridging*. 2006.
- [23]. Ribeiro, J.P.B.S., *Reabilitação Bioclimática de Edifícios de Habitação de Construção mista, um caso de estudo em Lisboa*, in *Faculdade de Arquitectura*. 2007, Universidade Técnica de Lisboa: Lisboa.
- [24]. Pereira, M.C., *Energias Renováveis, a Opção Inadiável*. 1998.
- [25]. Ferreira, M.A.M.A., *A eficiência energética na reabilitação de edifícios*, in *Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente*. 2009, Universidade Nova de Lisboa: Lisboa.
- [26]. *Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais*,
- [27]. Vieira, M.J.d.F.A., *Técnicas construtivas ambientalmente adequadas*. 2008.
- [28]. Jardim, F.M.G., *Proposta de Intervenção de Reabilitação Energética de Edifícios de Habitação*. 2009, Universidade do Minho.
- [29]. Gonçalves, H. and J.M. Graça, *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. 2004.
- [30]. Moita, F., *Energia Solar Passiva*, ed. A.e. AUTOR. 2010, Lisboa.
- [31]. *RCCTE - Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios*, Decreto-Lei nº 80/2006. Diário da República I série A. 69 (04-04-2006). 15-20.
- [32]. Magalhães, A.M.N.R., *Integração das tecnologias solares passivas no projecto de arquitectura corrente*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2004, Universidade de Coimbra: Coimbra.



- 
- [33]. Tyagi, V.V. and D. Buddhi, *PCM thermal storage in buildings: A state of art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007. **11**(6): p. 1146-1166.
- [34]. Fanger, P.O., *Thermal Confort - Analysis and Applications in Environmental Engineering*. 1970.
- [35]. Moore, F., *Enviromental Control Systems - heating cooling lighting*. 1993.
- [36]. Panão, M.J.N.O. and H.J.P. Gonçalves, *Solar XXI building: proof of concept or a concept to be proved?*
- [37]. McPhillips, M., *Vivendas con Energia Solar Pasiva*. 1985.
- [38]. Gonzalo, G., *Manual de Arquitectura Bioclimática*. 1998.
- [39]. *Arquitectura Bioclimática*. Disponível em [http://repositorio.uportu.pt/dspace/bitstream/123456789/301/9/TDH%2029%20\(9\).pdf](http://repositorio.uportu.pt/dspace/bitstream/123456789/301/9/TDH%2029%20(9).pdf). Acedido a [11 de Abril de 2011].
- [40]. Martín-Consuegra, F., *Investigación sobre el Comportamiento Térmico de Soluciones Constructivas Bioclimáticas Aplicación de Nuevas Tecnologías para la Rehabilitación Sostenible de Edificios*. 2006-2008. Disponível em: [http://www.sostenibilidad-es.org/sites/default/files/Documentos/plat\\_urbana/reconsost\\_muros\\_trombe.pdf](http://www.sostenibilidad-es.org/sites/default/files/Documentos/plat_urbana/reconsost_muros_trombe.pdf), data de acesso [25/11/10].
- [41]. Associates, S.W., *The Passive Solar Design and Construction Handbook*. 1998.
- [42]. Moita, F., *Energia Solar Passiva*. 1985. **Vol. II**.
- [43]. Goulding, J.R. and J.O. Lewis, *Bioclimatic Architecture (Thermie Programme)*. 1997.
- [44]. Cabirol, T. and D. Roux, *O Aquecimento das Habitações e a Energia Solar*. Vol. Vol. II. 1982.
- [45]. Olgyay, V., *Arquitectura y Clima - Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas*. 1998.
- [46]. Yun, G.Y., K. Steemers, and N. Baker, *Natural ventilation in practice: linking facade design, thermal performance, occupant perception and control*.
- [47]. Mascaro, L.R.d., *Energia na Edificação - Estratégias para Minimizar o Consumo*. 1991.
- [48]. Graça, G.C.d., P.F. Linden, and M. Brook, *Design of the natural ventilation system for the New san diego children's museum*, in *Ninth International IBPSA*. 2005: Montréal, Canada.
- [49]. Mehta, M., *Natural ventilation analyses of an office building with open Atrium*, in *Ninth International IBPSA*. 2005: Montréal, Canada.
-

- [50]. Lee, K.H. and R.K. Strand, *Implementation of an earth tube system into energyplus program*.
- [51]. *Edifício Solar XXI - Um Edifício Energéticamente Eficiente em Portugal*, INETI, Dezembro de 2005.
- [52]. F. J. Neila González, C.A.R., E. Higuera García, C. Bedoya Frutos (2008) *Phase Change Materials (PCMs) for energy storage in architecture. Use with the Magic Box prototype*.
- [53]. Soares, N., et al., *Numerical simulation of a PCM shutter for buildings space heating during the winter*, in *World Renewable Energy Congress 2011*: Sweden.
- [54]. R. Fioretti, P.P., *Analisi teorico-sperimentale su blocchi termici in laterizio a prestazioni energetiche avanzate*. 2010.
- [55]. Alawadhi, E.M., *Thermal analysis of a building brick containing phase change material*. *Energy and Buildings*, 2008. **40**(3): p. 351-357.
- [56]. Kuznik, F., J. Virgone, and J. Noel, *Optimization of a phase change material wallboard for building use*. *Applied Thermal Engineering*, 2008. **28**(11-12): p. 1291-1298.
- [57]. Castell, A., et al., *Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling*. *Energy and Buildings*, 2010. **42**(4): p. 534-540.
- [58]. Ruben Baetens, B.P.J., Arild Gustavsen, *Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review*. 2010.
- [59]. Abhat, A., *Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials*. *Solar Energy*, 1983. **30**(4): p. 313-332.
- [60]. Kelly, R. *Latent Heat Storage in Building Materials*. AMEC Desing.
- [61]. Silva, N.T.D.F.d., *Incorporação de Materiais de Mudança de Fase em Materiais de Construção*. 2009, Universidade do Minho.
- [62]. Cardoso, I., *Aplicação de microcápsulas de PCM em materiais de isolamento térmico para fatos de protecção e combate ao fogo*, in *Departamento de Engenharia Têxtil*. 2006, Universidade do Minho: Guimarães.
- [63]. Maldonado, P.A., *Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings*. 2011.
- [64]. Rodrigues, V., *Aplicações de PCMs na climatização de edifícios*. 2009.
- [65]. Cardoso, I., *Aplicação de microcápsulas de PCM em materiais de isolamento térmico para fatos de protecção e combate ao fogo*, in *Departamento de Engenharia Têxtil*. 2006, Universidade do Minho: Guimarães.

- 
- [66]. Junfeng Su, L.W., Li Ren, *Fabrication and thermal properties of microPCMs: Used melamine-formaldehyde resin as shell material*. 2006: Journal of Applied Polymer Science.
- [67]. Zhang, X.-x., et al., *Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes*. Journal of Colloid and Interface Science, 2005. **281**(2): p. 299-306.
- [68]. Zhang, Y., et al., *Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook*. Building and Environment, 2007. **42**(6): p. 2197-2209.
- [69]. Athienitis, A.K., et al., *Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage*. Building and Environment, 1997. **32**(5): p. 405-410.
- [70]. Darkwa, K., P.W. O'Callaghan, and D. Tetlow, *Phase-change drywalls in a passive-solar building*. Applied Energy, 2006. **83**(5): p. 425-435.
- [71]. Chen, C., et al., *A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard*. Energy and Buildings, 2008. **40**(5): p. 882-890.
- [72]. Kalousk M, H.J., *Simulation of the summer indoor thermal comfort by using wallboard with phase change material*. 2003.
- [73]. Oliver A., N.F.J., García A., *Thermal characterization of gypsum boards with PCM*. Informes de la Construcción 2010: 62(519): 55-66., 2010.
- [74]. Schossig, P., et al., *Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005. **89**(2-3): p. 297-306.
- [75]. Castellón, C., *Use of Microencapsulated Phase Change Material in buildings*. 2008, Universitat de Lleida: Lleida (Spain).
- [76]. Carbonari, A., et al., *Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls*. Energy and Buildings, 2006. **38**(5): p. 472-483.
- [77]. Hawes, D.W., D. Feldman, and D. Banu, *Latent heat storage in building materials*. Energy and Buildings, 1993. **20**(1): p. 77-86.
- [78]. Mehling H., K.R., Hauer A., *Research project on PCM in woodlightweight-concrete*. Proceedings of IEA, ECES Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage and Techniques-Feasibility Studies and Demonstration Projects 2nd Workshop. Ljubljana (Slovenia). 2002.
- [79]. Ismail, K.A.R. and J.R. Henríquez, *Thermally effective windows with moving phase change material curtains*. Applied Thermal Engineering, 2001. **21**(18): p. 1909-1923.
- [80]. Weinläder, H., A. Beck, and J. Fricke, *PCM-facade-panel for daylighting and room heating*. Solar Energy, 2005. **78**(2): p. 177-186.
-

- [81]. Cabeza, L.F., et al., *Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings*. Energy and Buildings, 2007. **39**(2): p. 113-119.
- [82]. Shi W., Hou J., and Z. X., *Properties of paraffin phase-change-material(PCM) mass concrete for temperature control*. Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials 2010: 13(3): 414-417.
- [83]. Lai C., C.C., *How Phase Change Materials Affect Thermal Performance: Hollow Bricks*. Building Research e Information, 34:2, (2006) 118-130.
- [84]. Farouk, B. and Guceri, *Tromb-Michal wall using a phase change material*. *Proceedings of Second Miami International Conference on Alternative Energy*. Miami, FL (U.S.A.). , 1979.
- [85]. Bourdeau, L.E., *Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage*. *Proceedings of 5th National Passive Solar Conference*. Amherst. Newark, Delaware (U.S.A.), 1980: p. 19-26.
- [86]. Swet, C.J., *Phase change storage in passive solar architecture*. *Proceedings of 5th National Passive Solar Conference*. Amherst. Newark, Delaware (U.S.A.), 1980.
- [87]. Ghoneim, A., S. Klein, and J.A. Duffie, *Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials*. Solar Energy 1991: 47(3): 237-242.
- [88]. Chandra S. , et al., *Thermal performance of a non A/C building with PCM thermal storage wall*. *Energy Conversion and Management*. 1985: 25(1): 15-20.
- [89]. Knowler, T., *Proportioning composites for efficient-TSWs*. *Solar Energy* 1983: 31(3): 319-326.
- [90]. Buddhi, D. and S. Sharma, *Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: latent heat storage material*. *Energy Convers Manage* 1999;40:1979–84.
- [91]. Stritih, U. and P. Novak, *Solar heat storage wall for building ventilation*, In: *World renewable energy congress (WREC)*, 1996. p. 268–71.
- [92]. Castellón, C., et al., *Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Building Applications*. *Proceedings of Buildings X International Conference*. Clearwater Beach, FL (U.S.A.). 2007.
- [93]. *Micronal PCM Gypsum Wallboards*, Basf Aktiengesellschaft, 607056 Ludwigshafen, Germany.
- [94]. *Parede de Trombe*. Disponível em [http://www.sostenibilidad-es.org/sites/default/files/\\_Documentos/plat\\_urbana/reconsost\\_muros\\_trombe.pdf](http://www.sostenibilidad-es.org/sites/default/files/_Documentos/plat_urbana/reconsost_muros_trombe.pdf). Acedido a [ 25 de Novembro de 2010.].

## **ANEXO 1. CONTROLO DO SOBREAQUECIMENTO**

---



Resultados da análise realizada sobre o controlo do sobreaquecimento com a aplicação de PCMs de elevada temperatura.

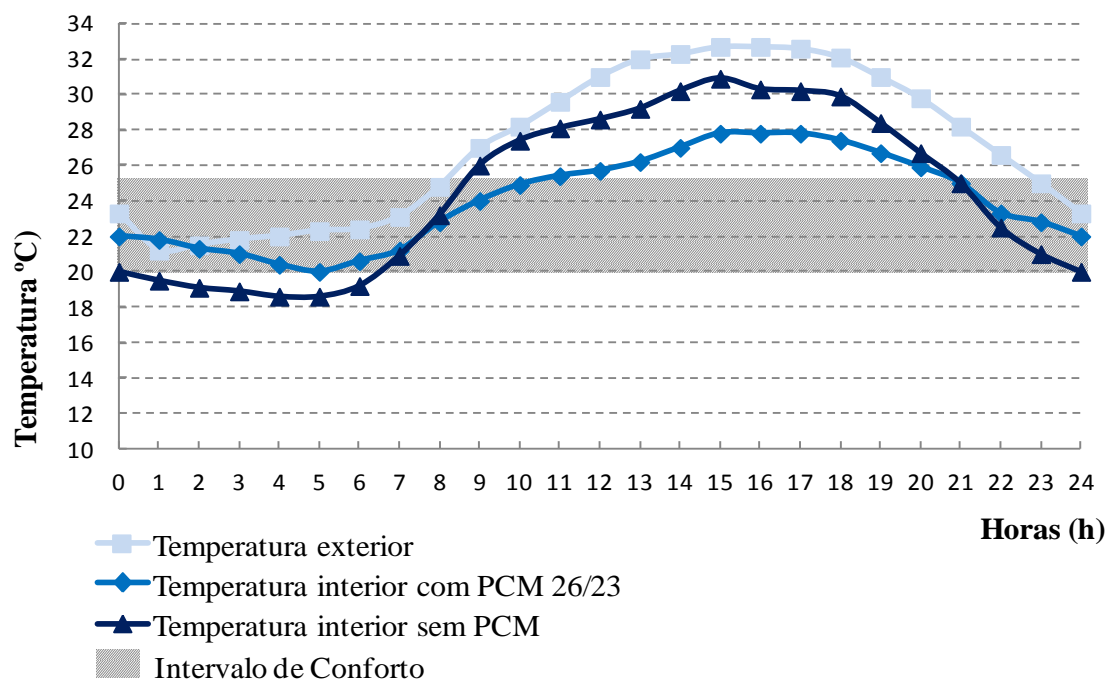


Figura 48: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 26/23

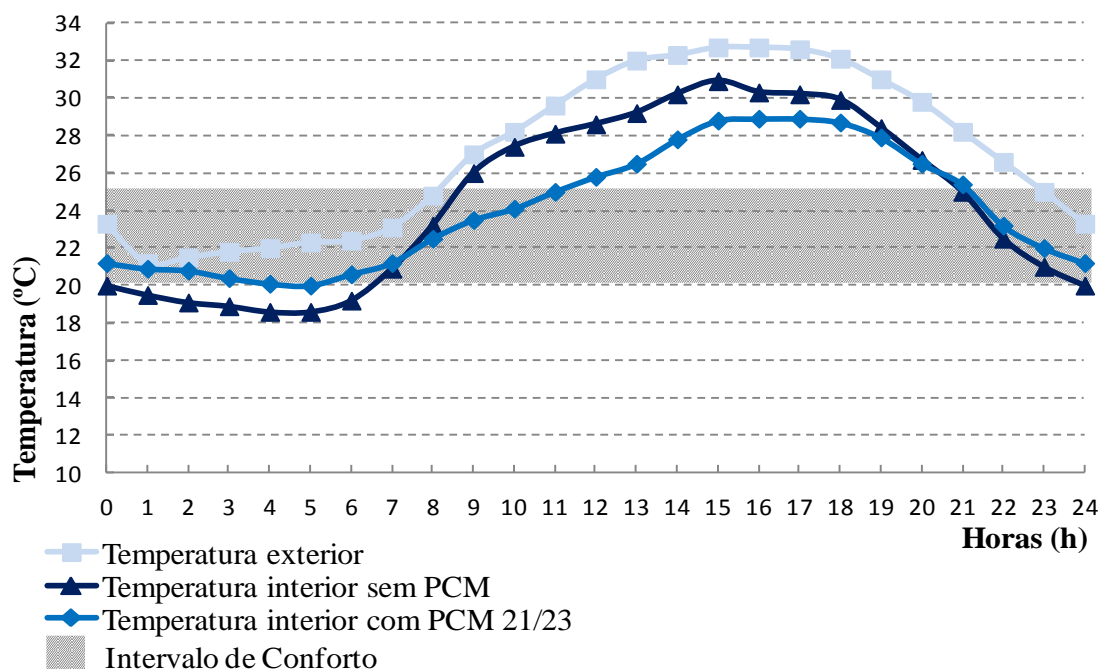


Figura 49: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 21/23

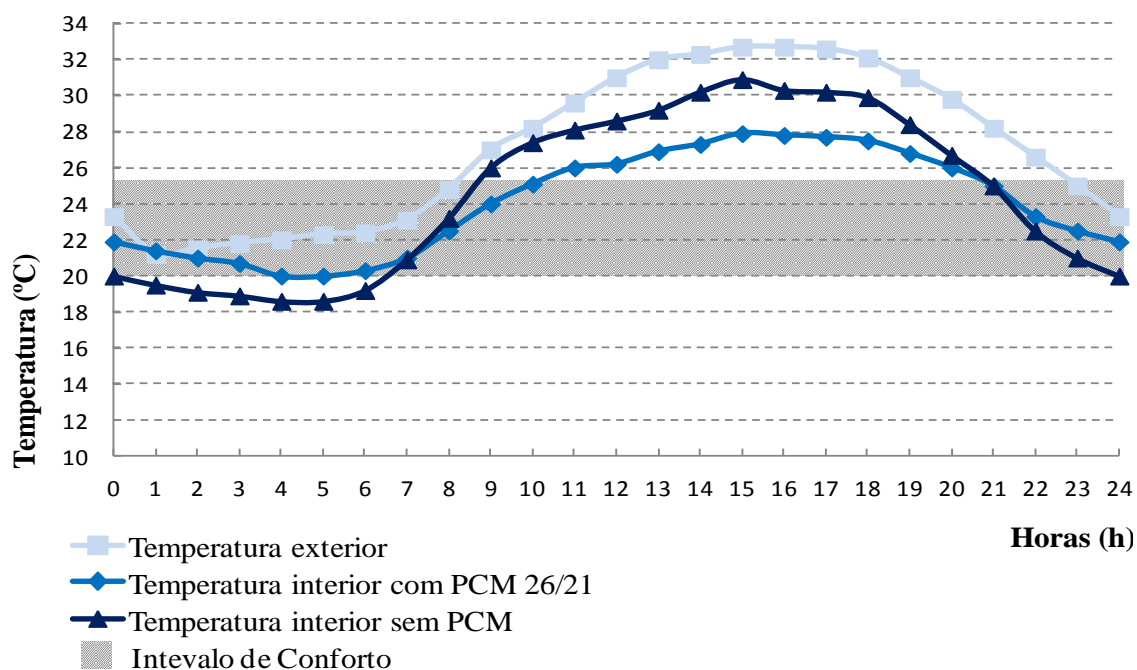


Figura 50: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 26/21

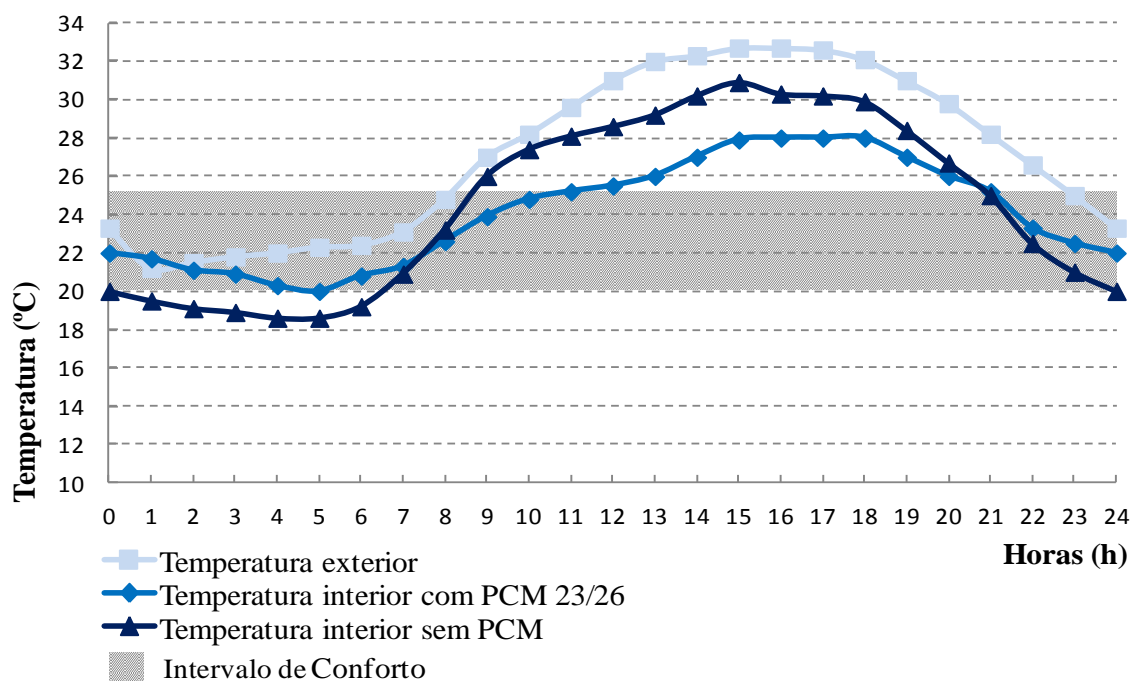


Figura 51: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 23/26



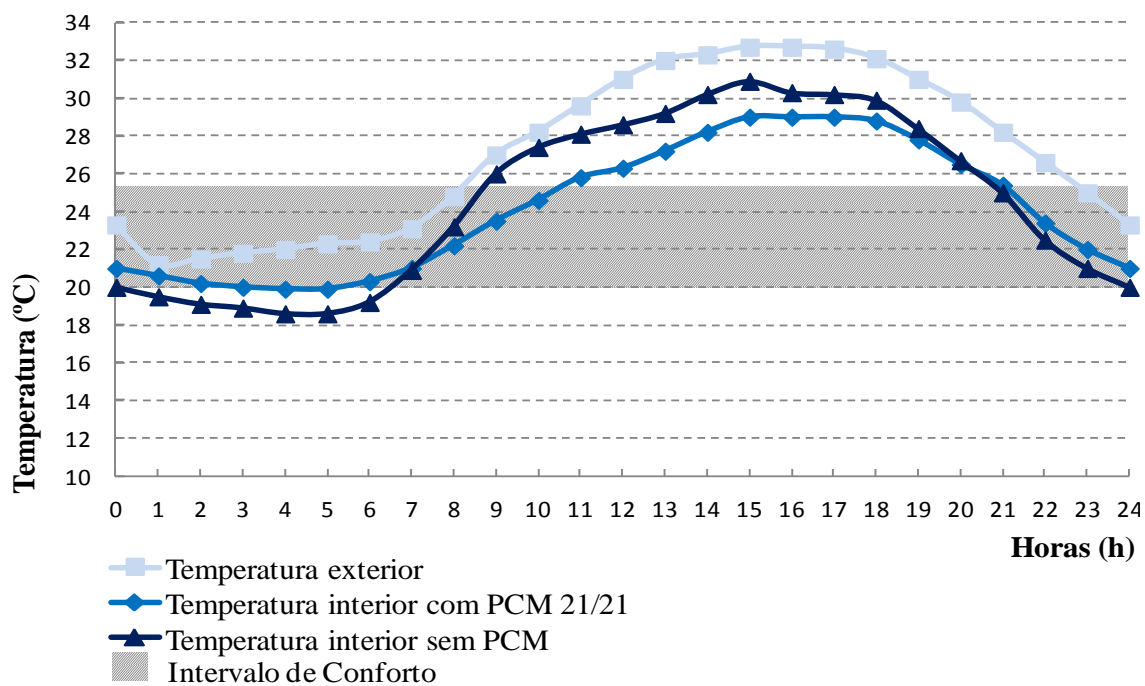


Figura 52: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 21/21

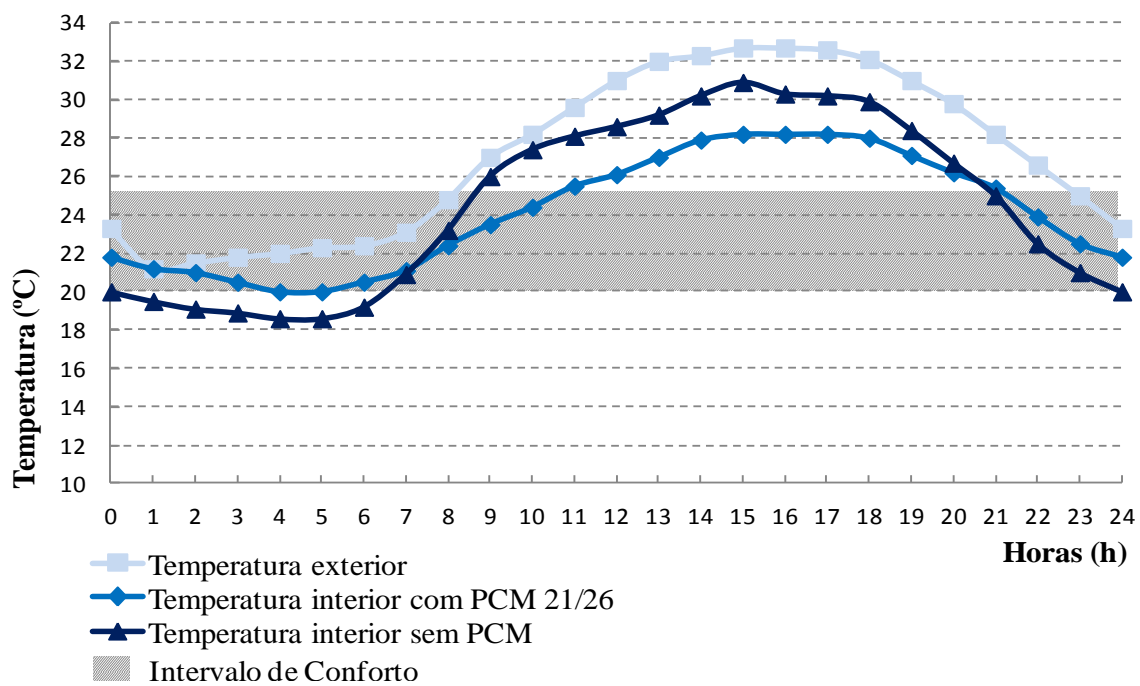


Figura 53: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 21/26

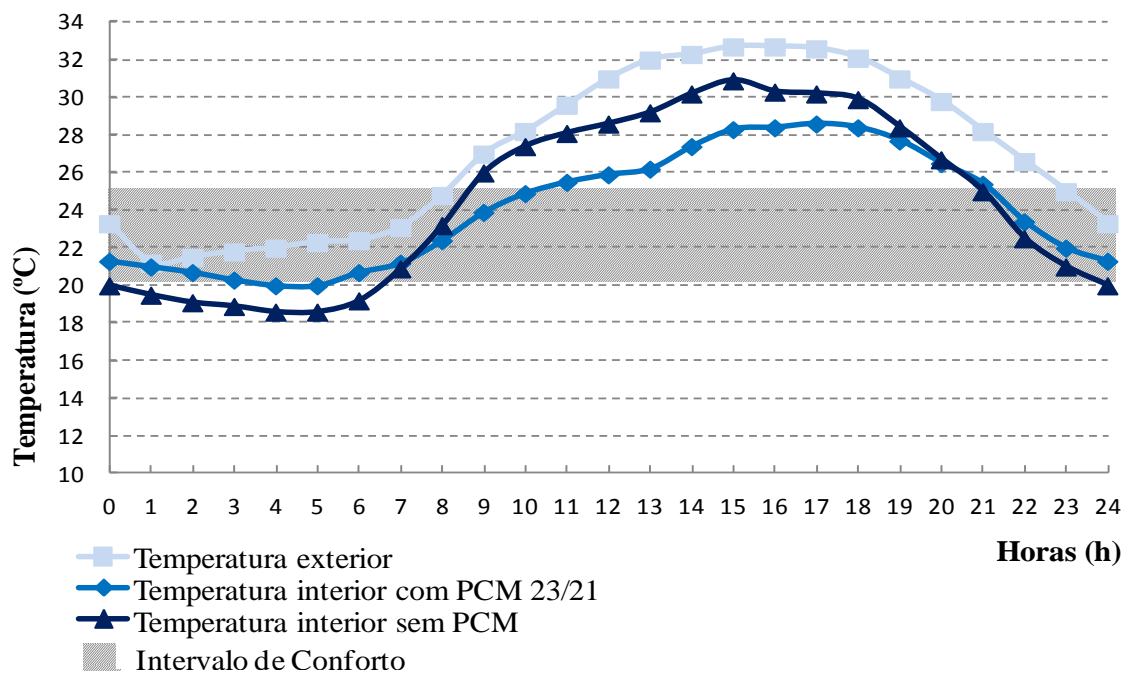


Figura 54: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 23/21

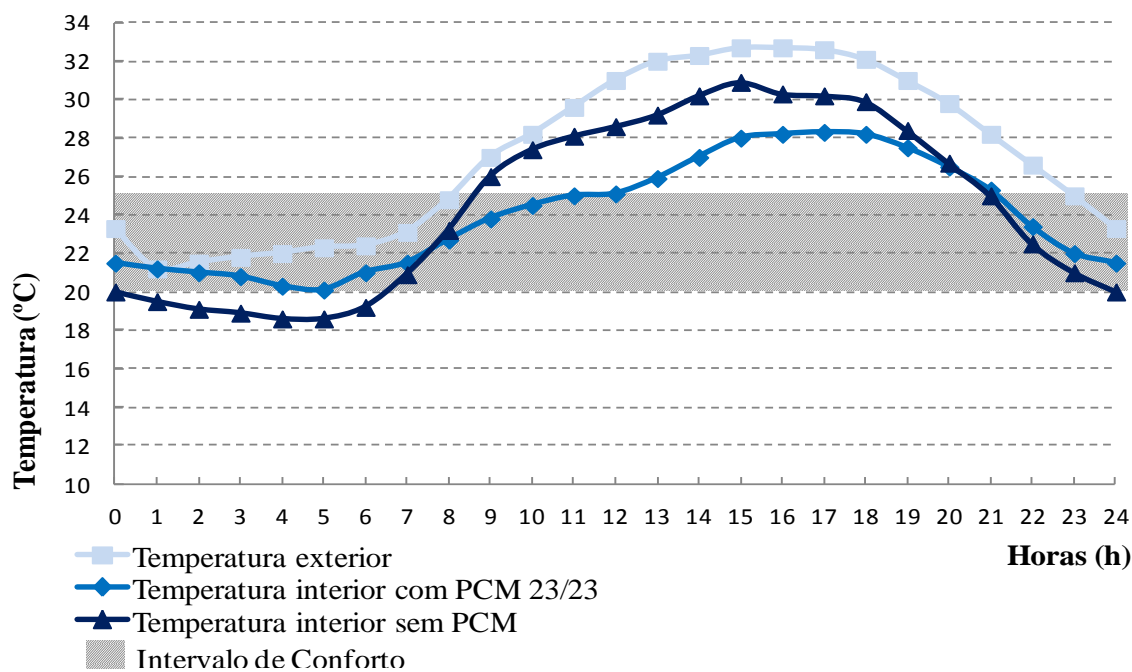


Figura 55: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente com a aplicação de PCM 23/23.

## **ANEXO 2. ARMAZENAMENTO E INÉRCIA**

---



Resultados da análise realizada sobre a capacidade de armazenamento com a aplicação de PCMs de baixas temperaturas.

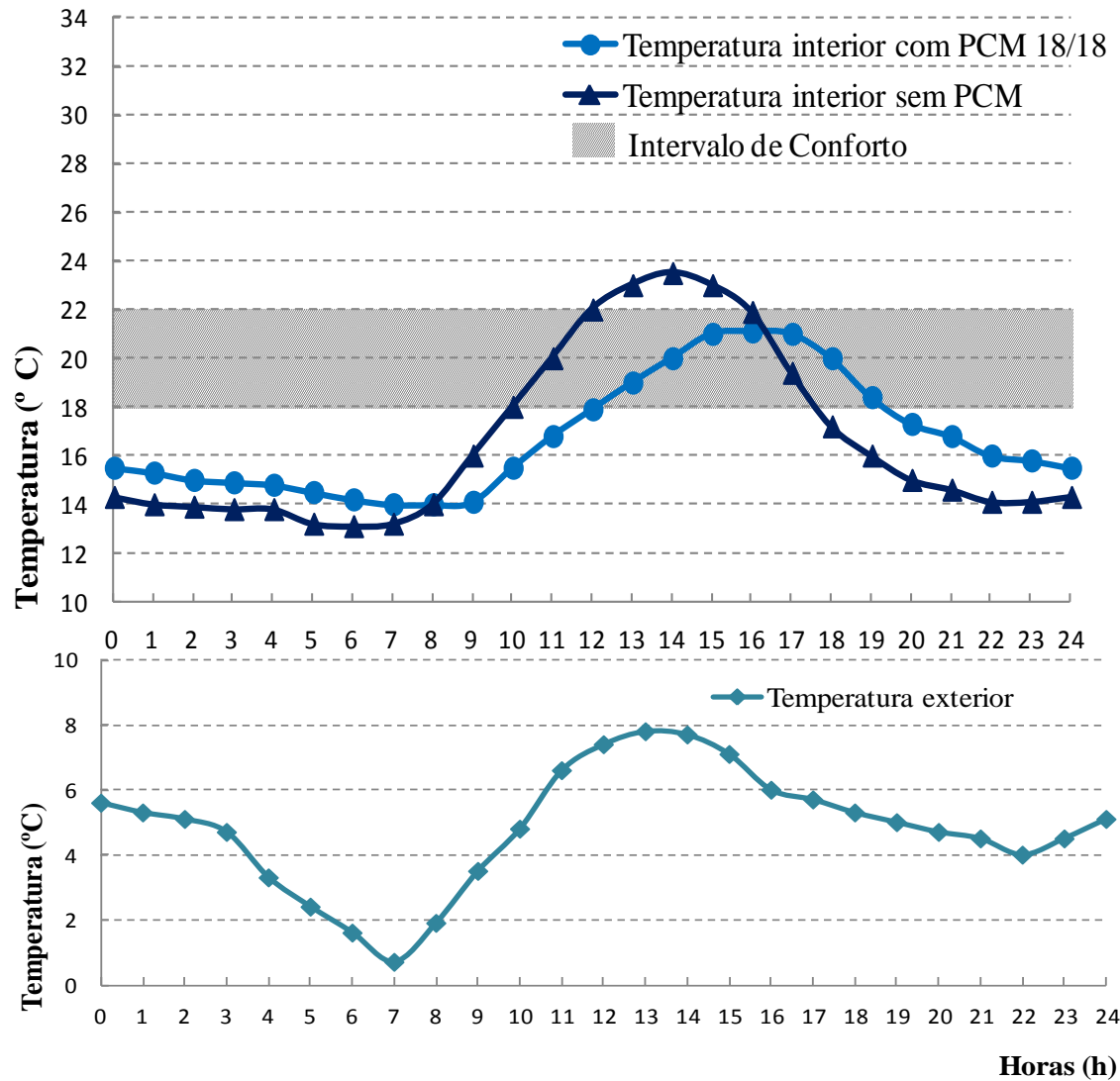


Figura 56: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais frio com a aplicação de PCM 18/18

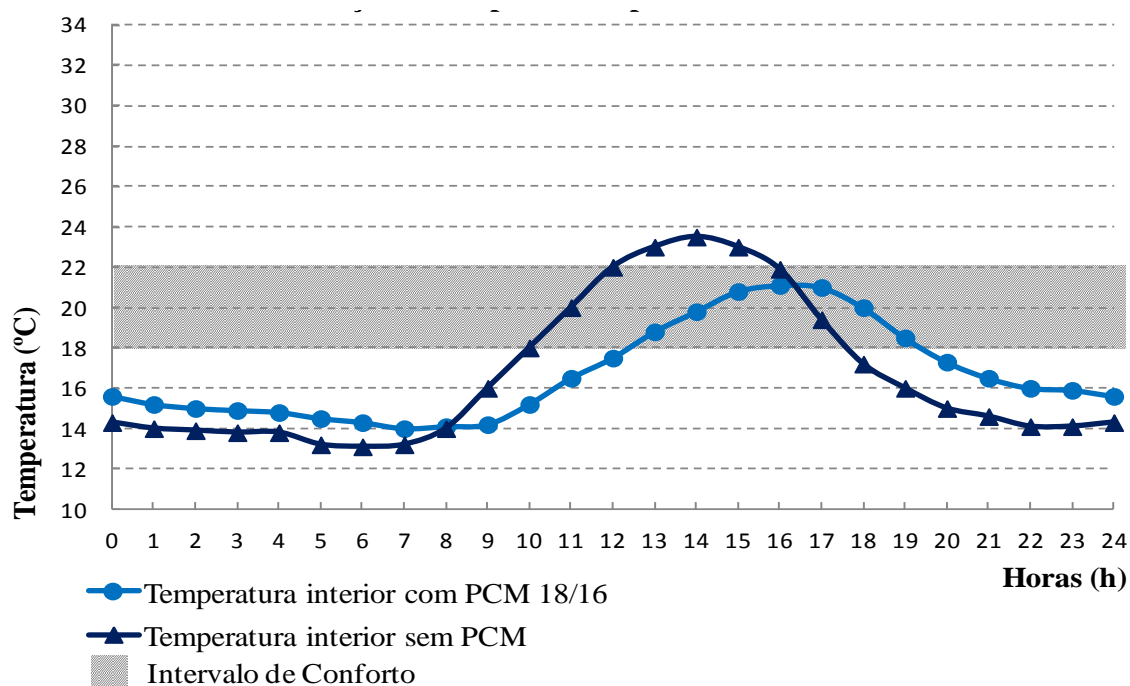


Figura 57: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais frio com a aplicação de PCM 18/16

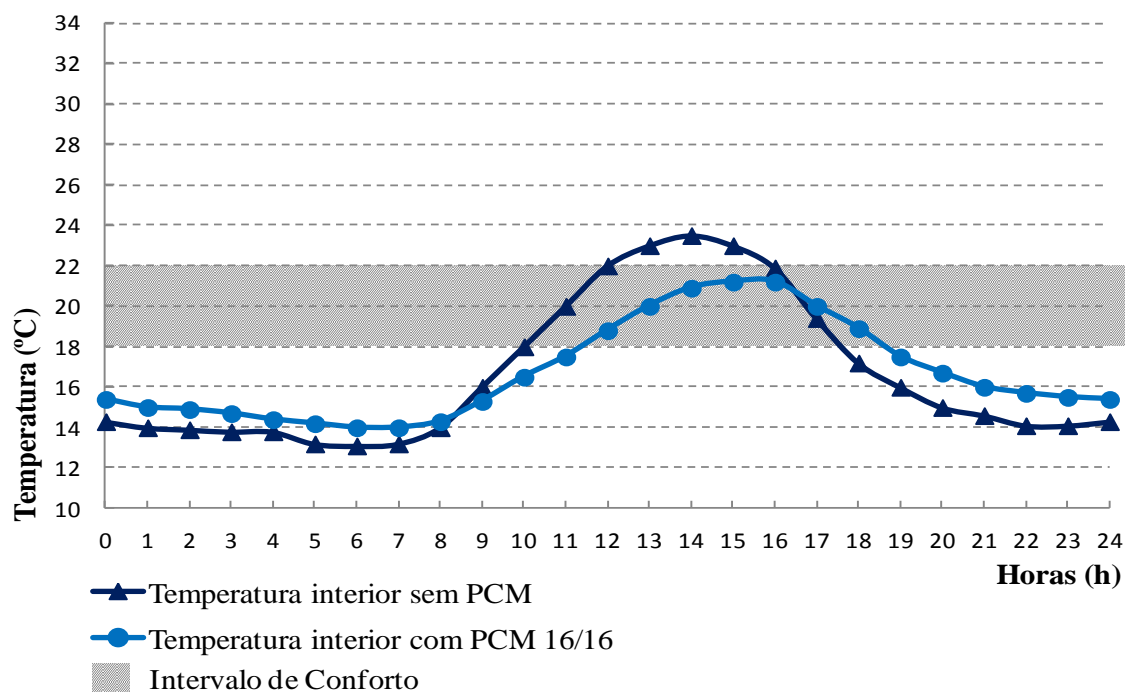


Figura 58: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais frio com a aplicação de PCM 16/16

### **ANEXO 3. SOLUÇÃO DE COMPROMISSO**





Resultados da análise realizada sobre a conjugação de PCMs com temperaturas de fusão elevadas com PCMs com temperaturas de fusão baixas.

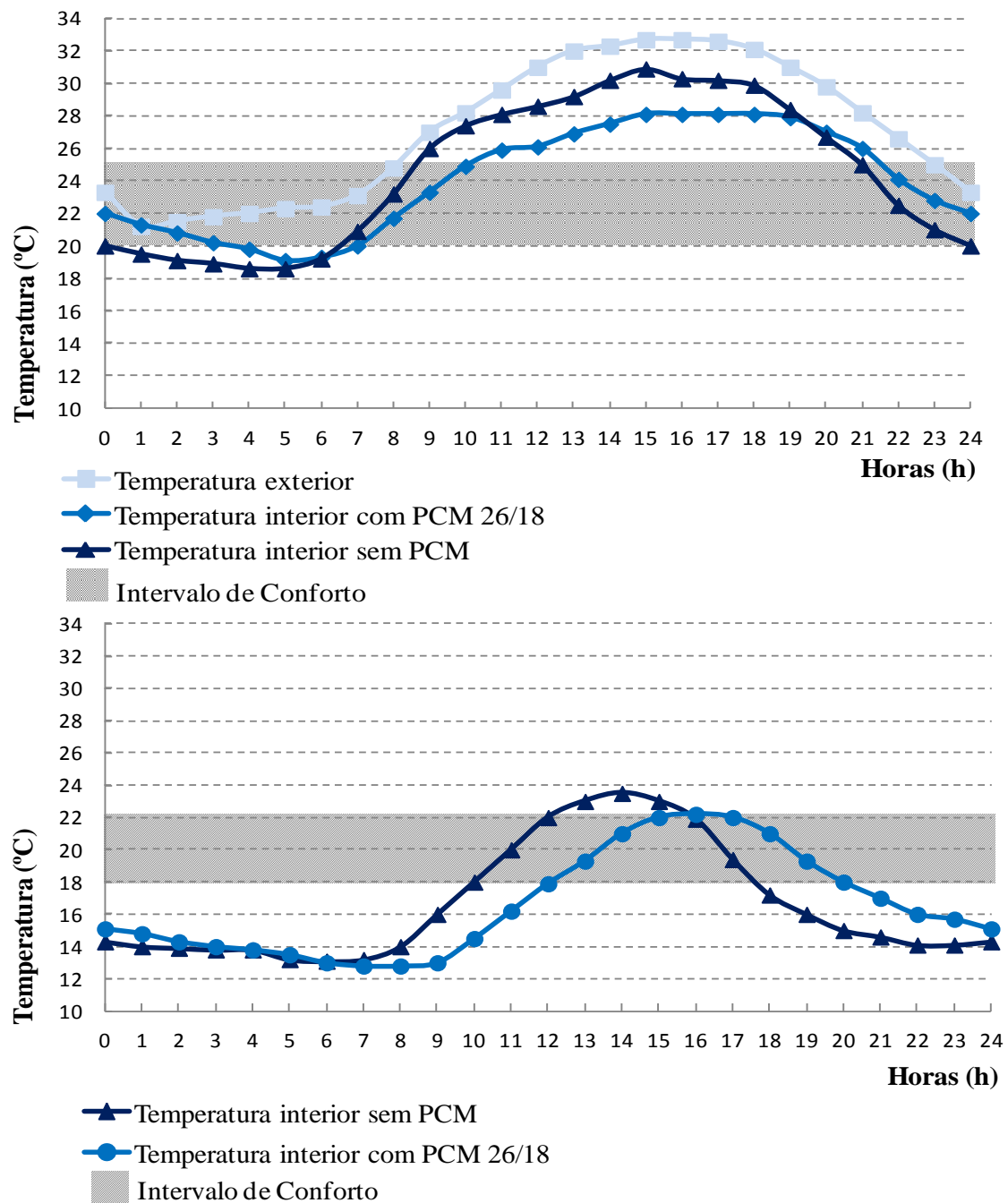


Figura 59: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 26/18

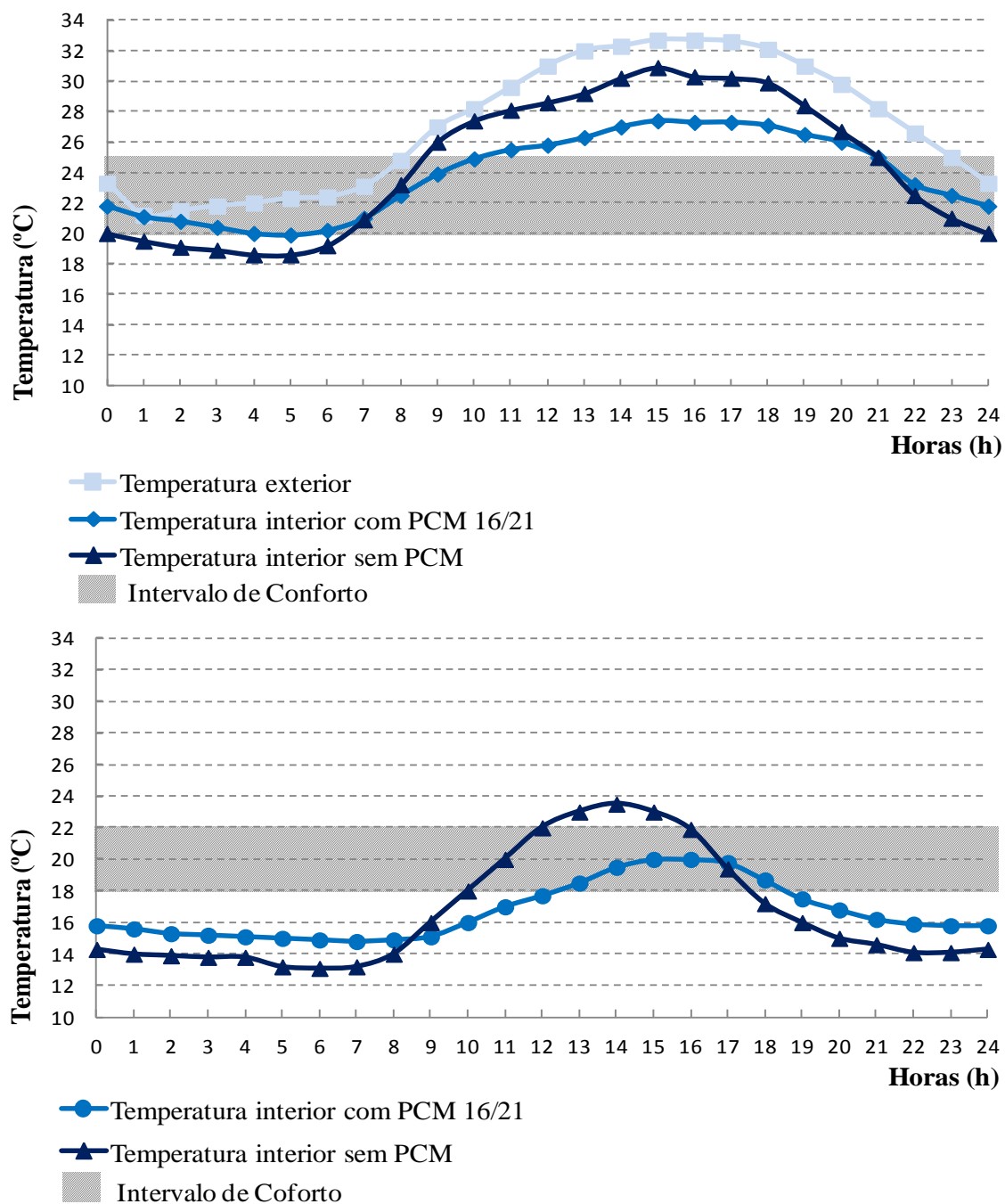


Figura 60: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 16/21

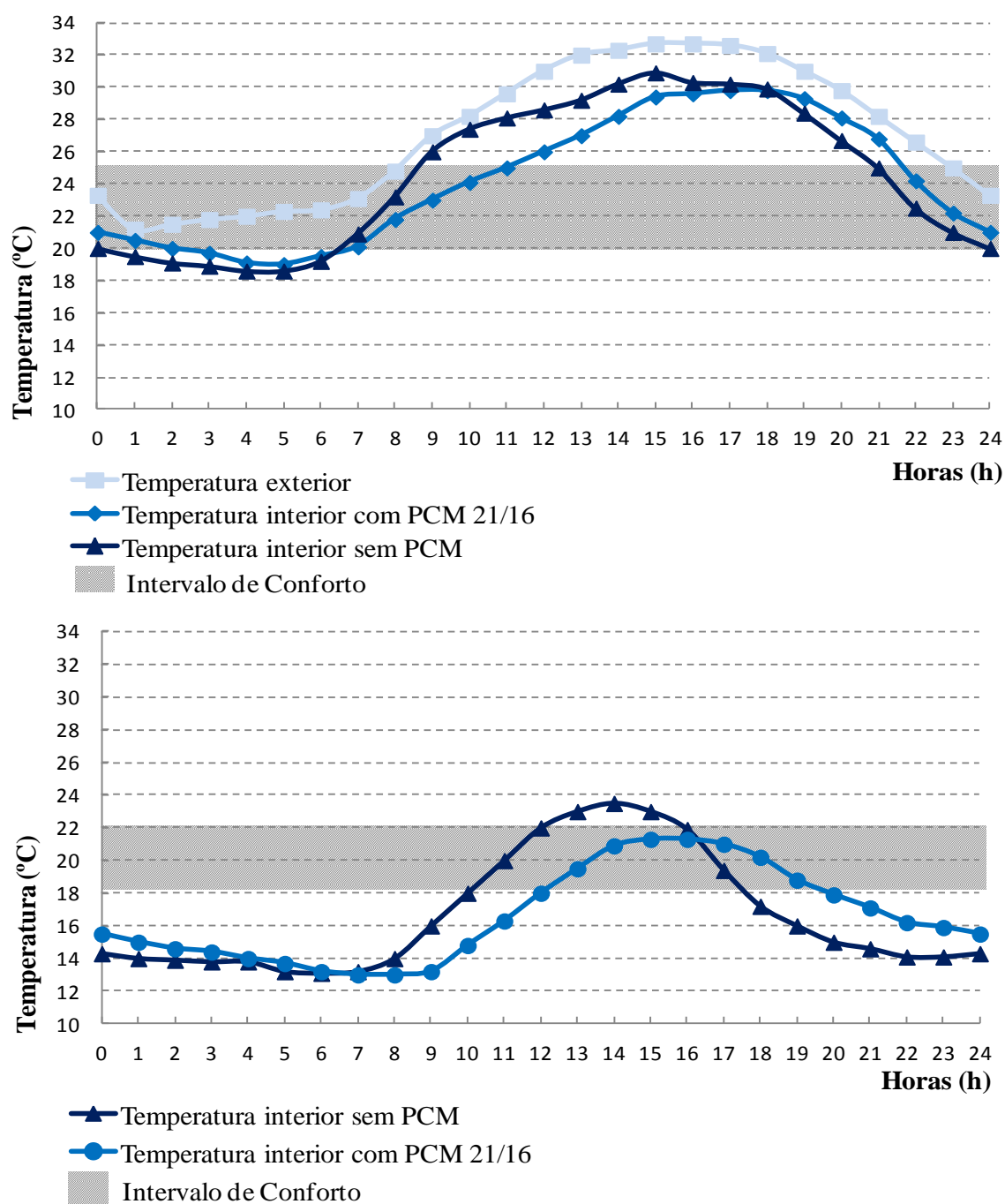


Figura 61: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 21/16

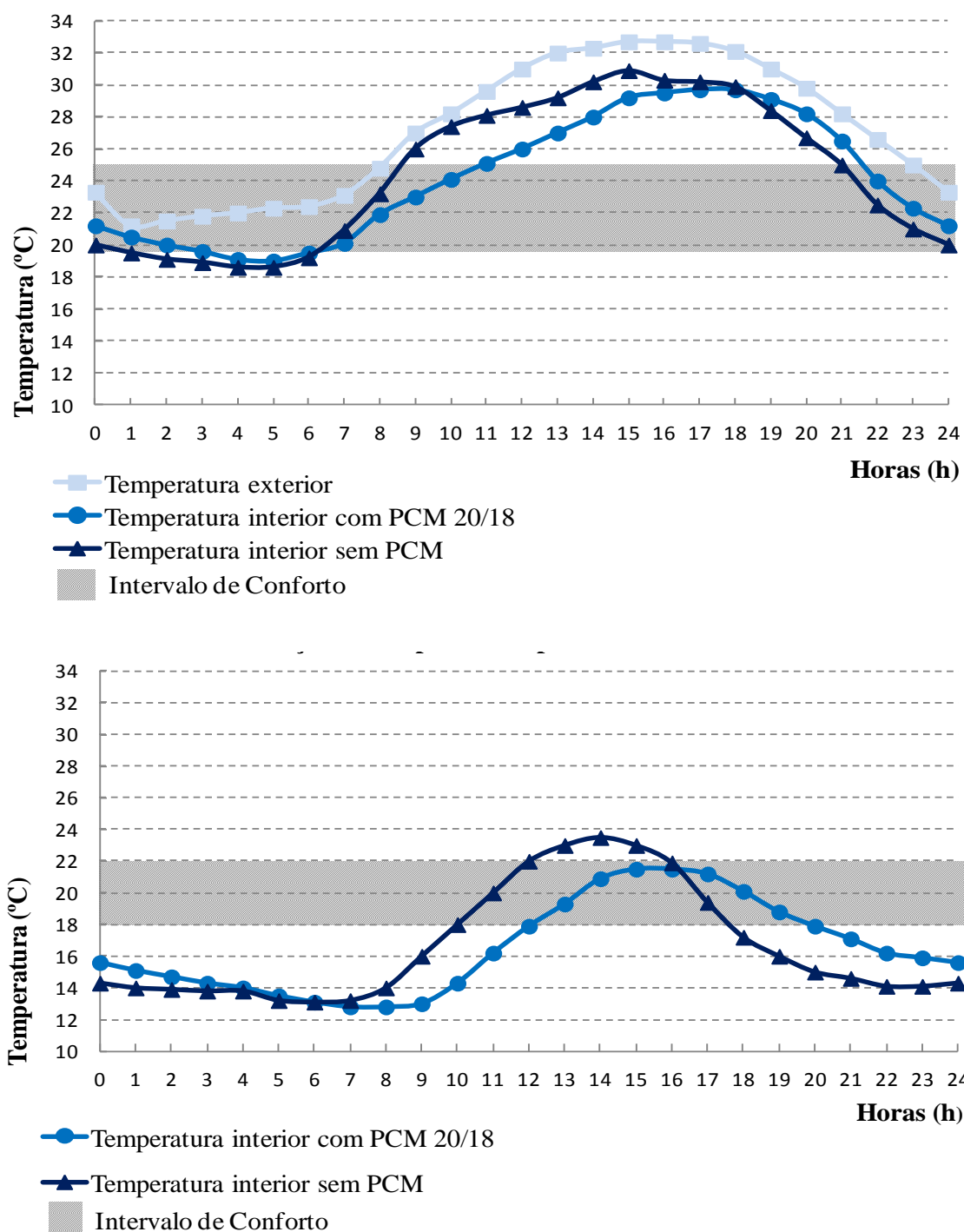


Figura 62: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 20/18

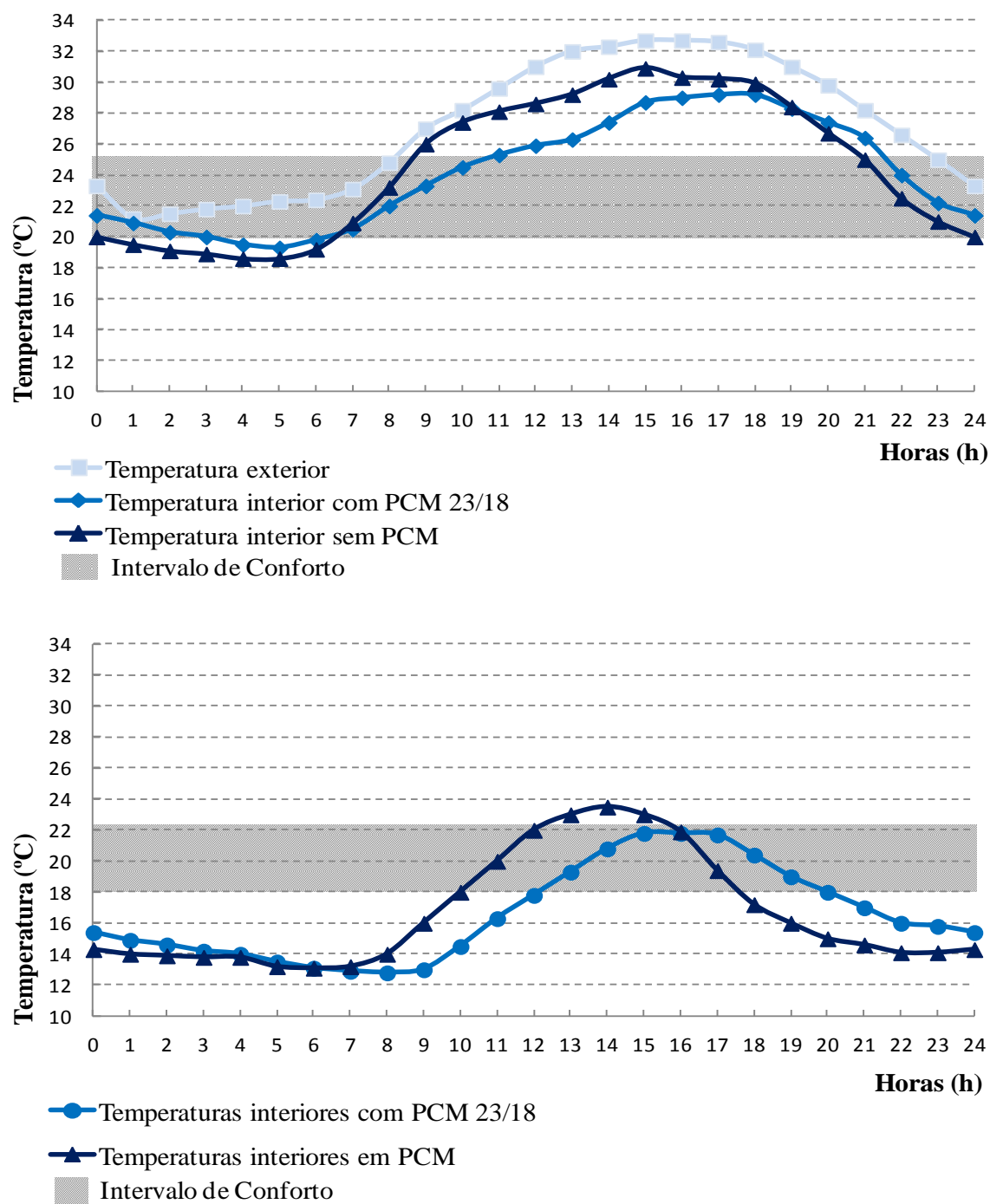


Figura 63: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 23/18

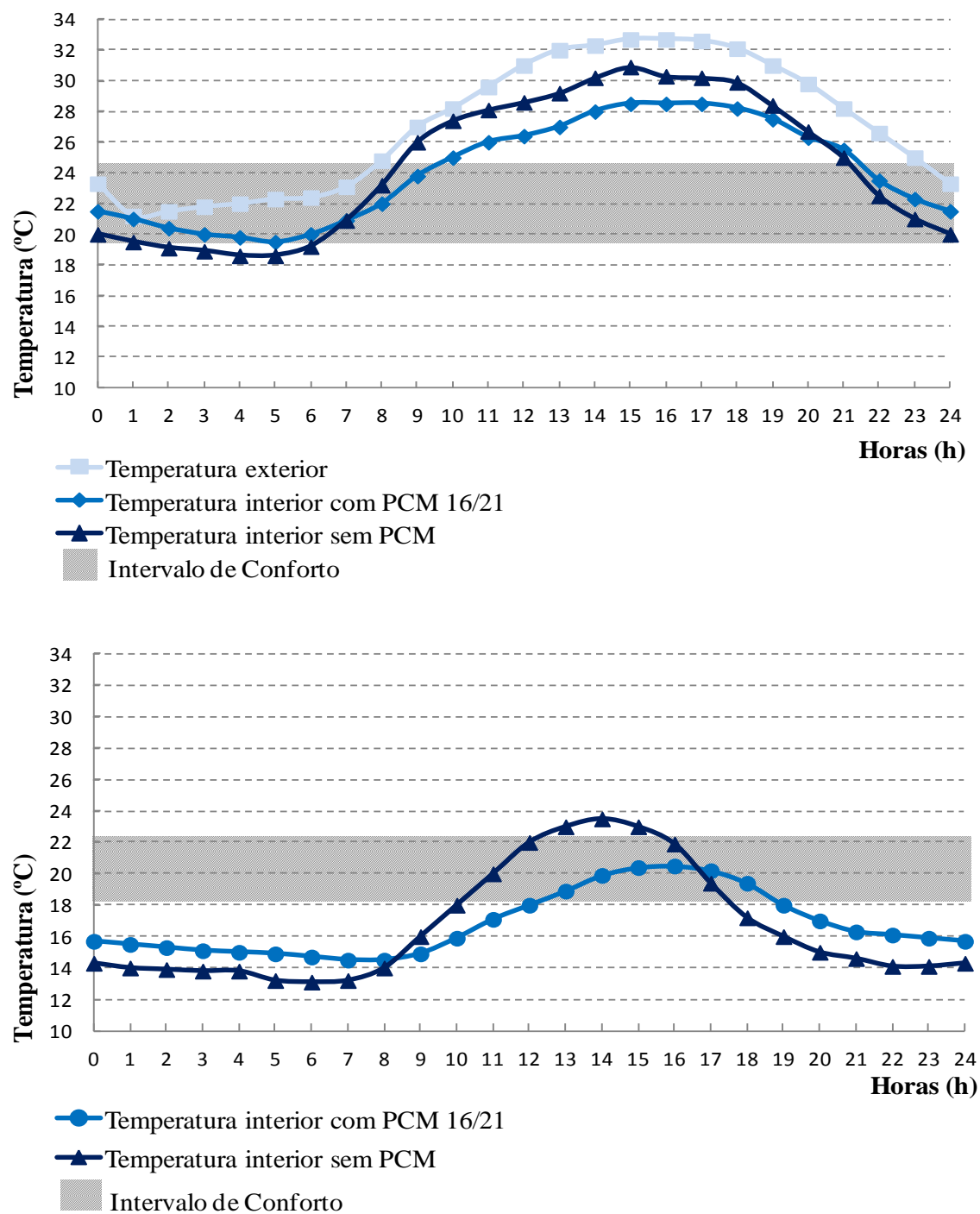


Figura 64: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 16/21

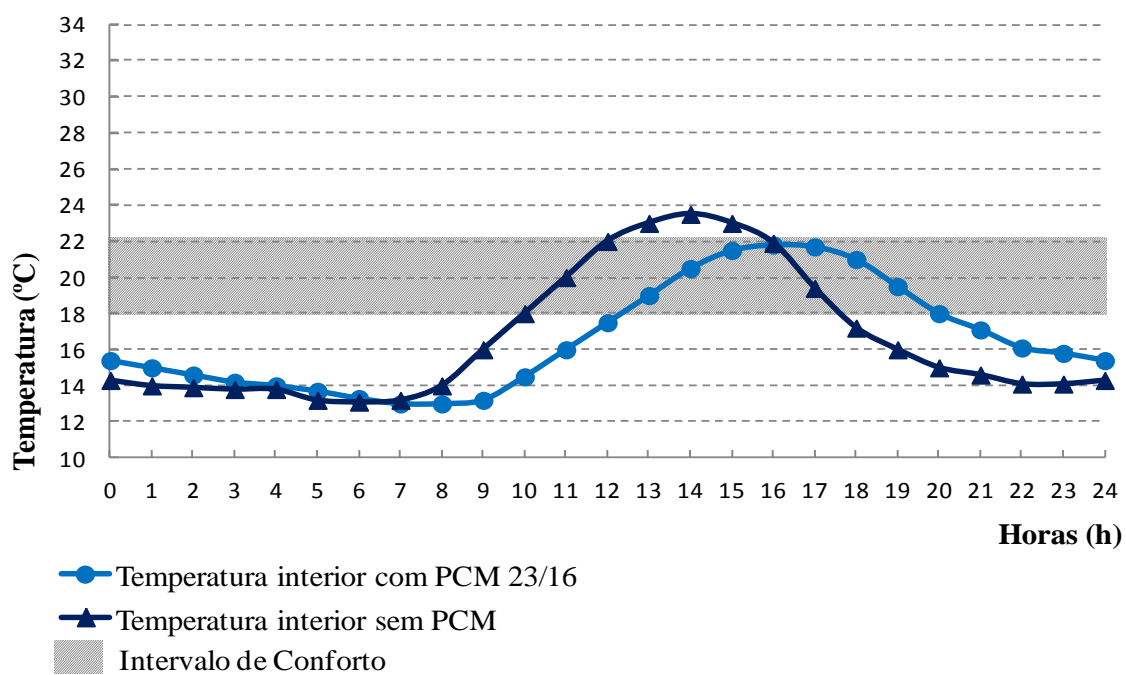
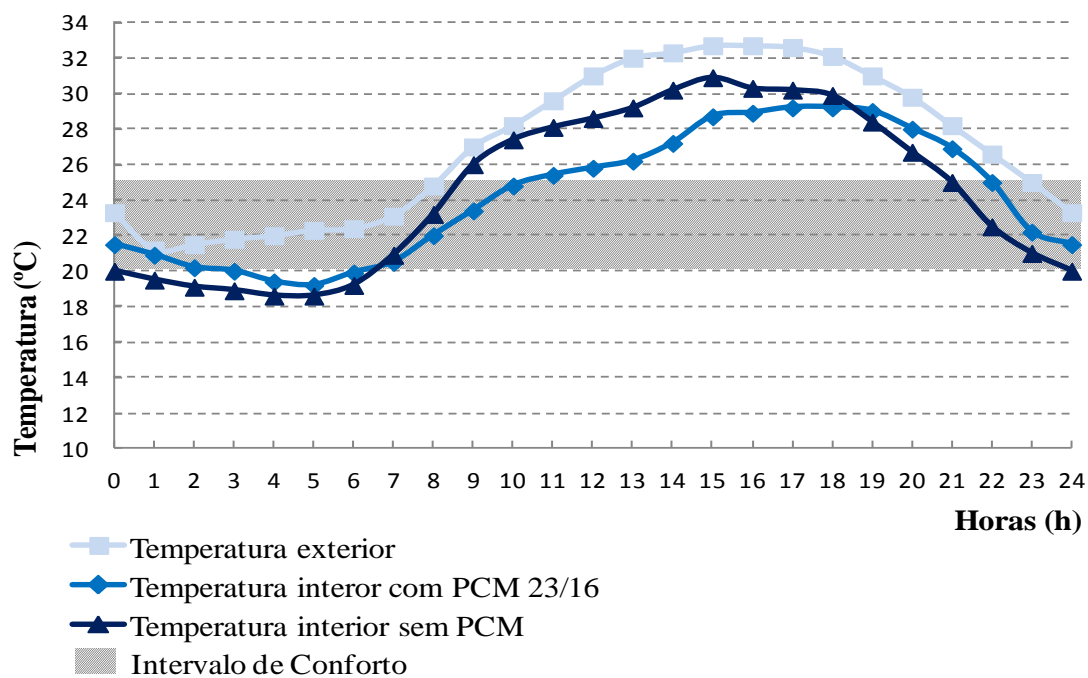


Figura 65: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 23/16

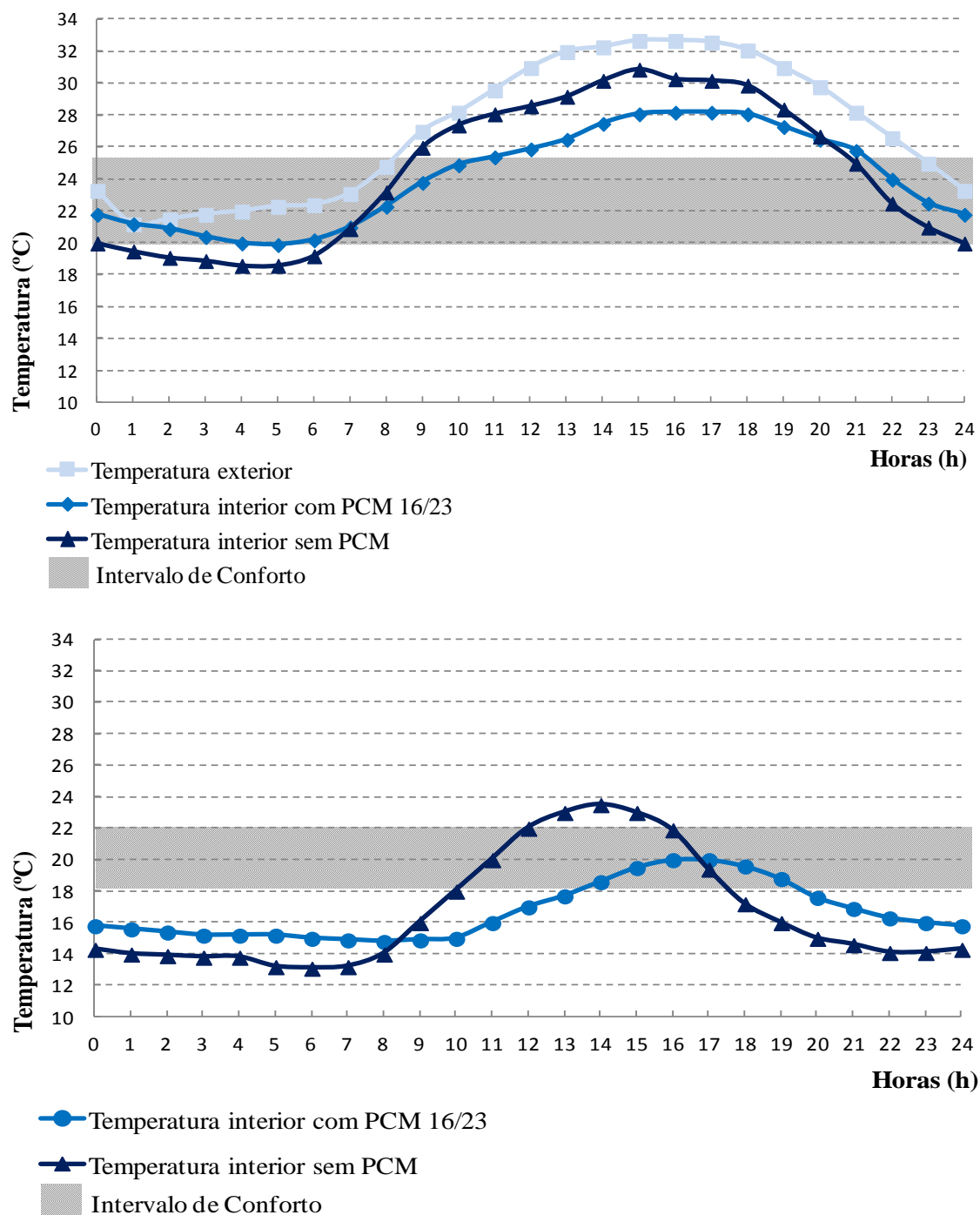


Figura 66: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 16/23



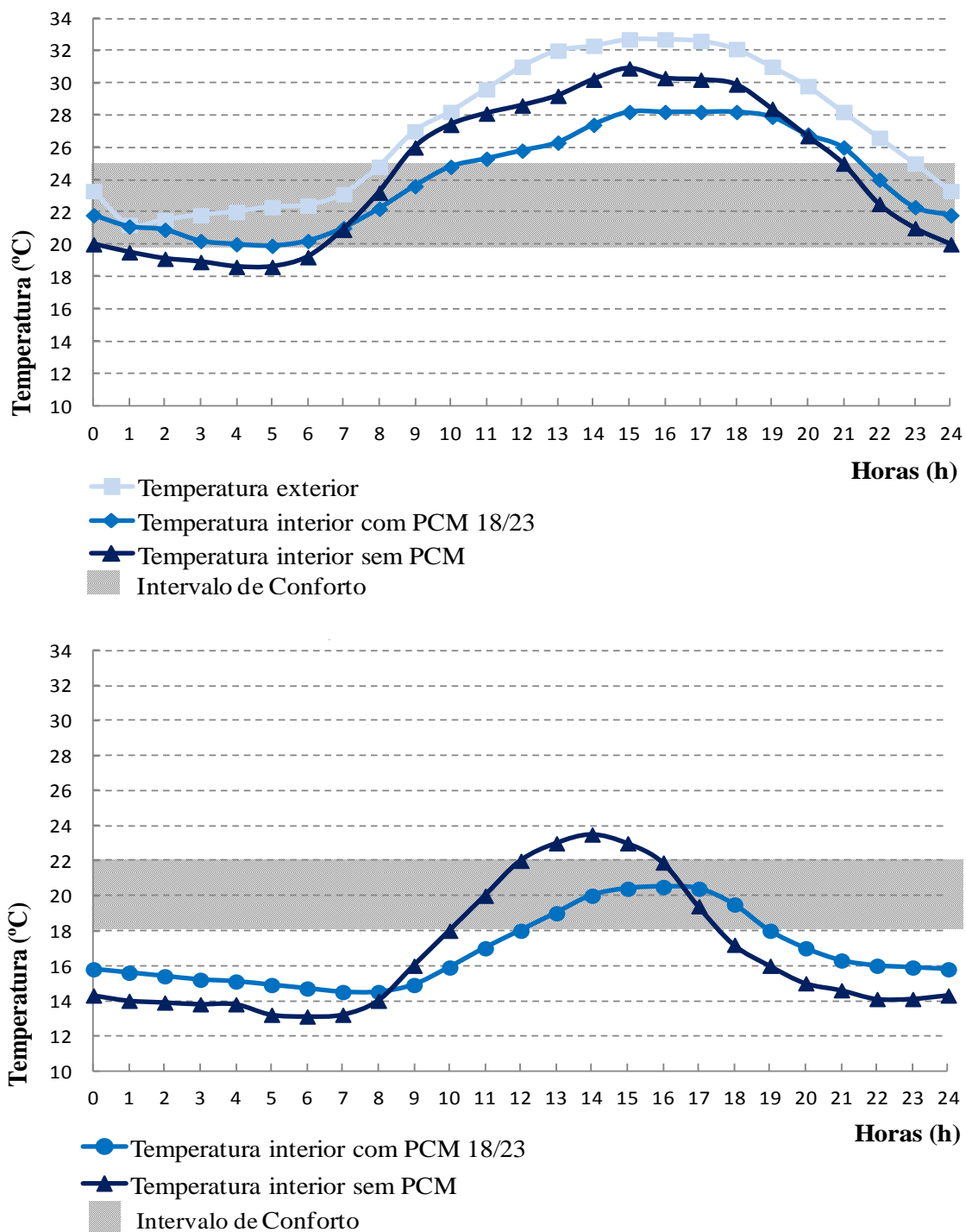


Figura 67: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 18/23

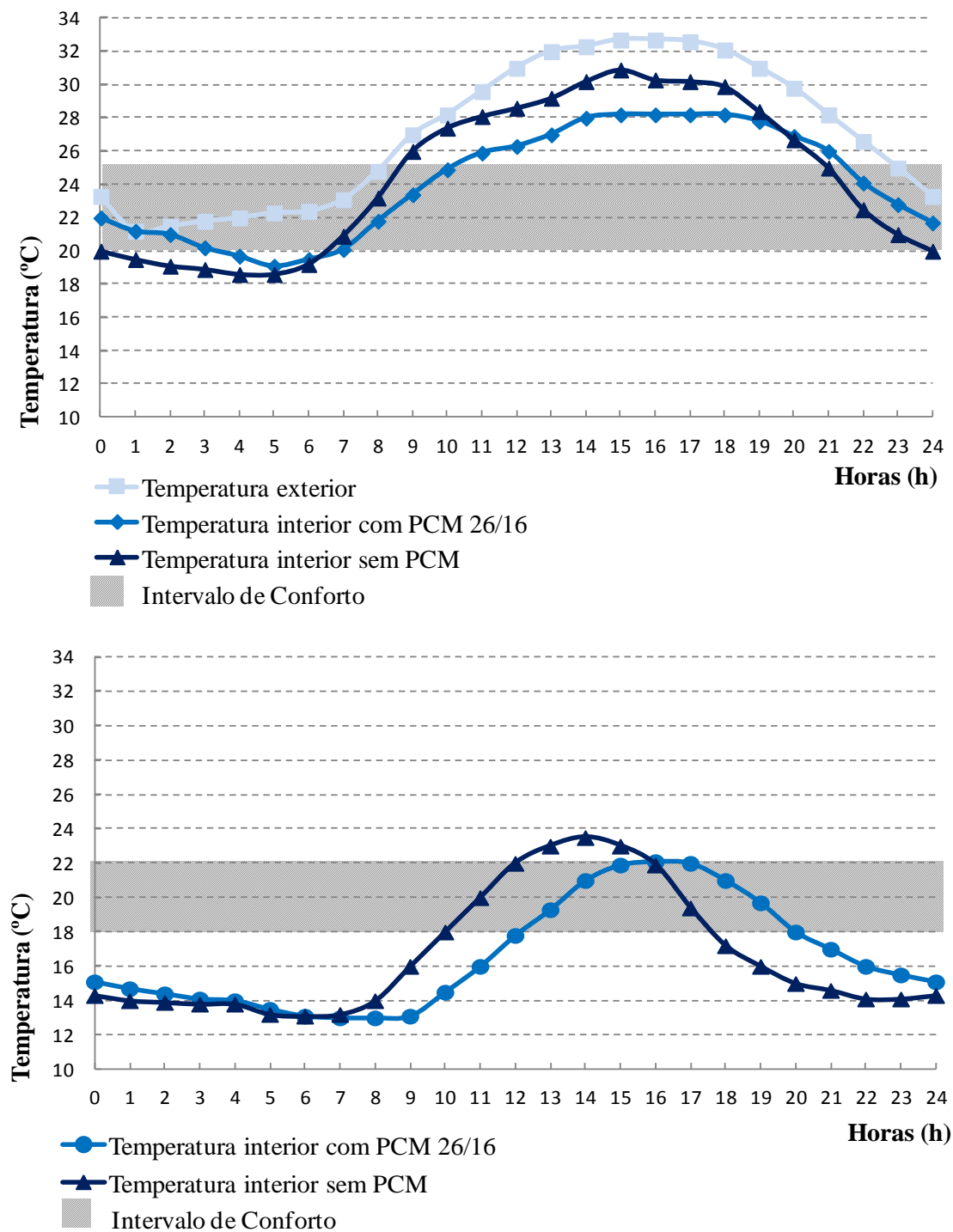


Figura 68: Evolução das temperaturas interiores e exterior, durante o período mais quente e mais frio com a aplicação de PCM 26/16